

Pro gradu -tutkielma

Maantiede

Luonnonmaantiede

Eteläsuomalaisen valuma-alueen eroosion mallinnus muuttuvassa ilmastossa  
fysikaalisella SWAT-mallilla

Viljami Ruohonen

2016

Ohjaaja: Miska Luoto

HELSINGIN YLIOPISTO  
GEOTIETEIDEN JA MAANTIETEEN LAITOS  
PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)  
00014 Helsingin yliopisto

|  |                             |  |  |
|--|-----------------------------|--|--|
| Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty   |                             | Laitos/Institution – Department        |  |
| Matemaattis-luonnontieteellinen  |                             | Geotieteiden ja maantieteen laitos     |  |
| Tekijä/Författare – Author   |                             |  |  |
| Viljami Arho Ilkanpoika Ruohonen   |                             |  |  |
| Työn nimi / Arbetets titel – Title   |                             |  |  |
| Eteläsuomalaisen valuma-alueen eroosion mallinnus muuttuvassa ilmastossa fysikaalisella SWAT-mallilla  |                             |  |  |
| Oppiaine /Läroämne – Subject   |                             |  |  |
| Maantiede (luonnonmaantiede)   |                             |  |  |
| Työn laji/Arbetets art – Level   | Aika/Datum – Month and year | Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages |  |
| Pro gradu -tutkielma   | 7/2016                      | 69                                     |  |
| Tiivistelmä/Referat – Abstract   |                             |  |  |
| <p>Niin kutsutun globaalimuutoksen seurauksena lämpötilat ja sademäärät Suomessa tulevat kasvamaan seuraavien vuosikymmenien aikana. Muuttuvan ilmaston yksi seuraus on myös kasvava eroosio, jonka uhat ja haitat on laajasti huomioitu. Etenkin talvikuukausien ilmaston oletetaan Suomessa muuttuvan kaikkein radikaaleimmin. Tässä tutkielmassa pyrittiin ennen kaikkea etsimään vastauksia siihen, kuinka paljon eroosio kasvaa globaalimuutoksen seurauksena eteläsuomalaisella valuma-alueella, mitkä tekijät vaikuttavat eroosion määrään lisäävästi tai hillitsevästi, sekä kuinka hyvin suosittu SWAT-malli toimii Suomen olosuhteissa.</p> <p>Fysikaalisen SWAT-mallin kalibroimiseen ja validoimiseen käytettiin kahta virtaaman mittausasemaa tutkimusalueen sisäpuolelta (Härkälänjoki ja Lepsämänjoen alaosa). Malli kalibroitiin 16 virtaamaa ja valuntaa kontrolloivalla parametrilla, ja sen toimivuuden mittareiksi valittiin <math>R^2</math> ja NS sekä P ja R-indeksit. Härkälänjoen <math>R^2</math> ja NS-lukemat kalibraation ja validaation osalta olivat 0,29 ja -0,05 sekä 0,30 ja -0,57. Lepsämänjoen arvot olivat 0,40 ja 0,34 kalibraatiossa sekä 0,54 ja 0,21 validaatiossa. Vastaavat P- ja R-indeksit olivat 0,33 ja 0,24 sekä 0,32 ja 0,29 kalibraatiossa, 0,42 ja 0,57 sekä 0,50 ja 0,63 validaatiossa. Lepsämänjoen alaosan osalta lukemat ovat vähintäänkin tyydyttäviä, Härkälänjoen arvot jäivät alle hyväksyttävän tason.</p> <p>RCP8.5-ennusteessa eroosio tulee kasvamaan n. 94 prosenttia verrattuna validaatiojaksoon, mutta alueellista vaihtelua on paljon eikä kasvu ole yksiselitteistä. Keskimääräinen vuotuinen eroosio oli 1,22 tonnia hehtaarilla. Suurinta eroosio on talvikuukausina, erityisesti vuoden kahtena ensimmäisenä kuukautena. Eroosio oli pienintä vesistöalueen reunoilla ja havumetsävaltaisilla alueilla. Suurin kasvu tapahtui alajuoksua lähellä olevilla valuma-alueilla. SWAT-malli on kaksijakoinen mallinnusohjelma. Toisaalta sen suosio on kasvanut viime vuosina, ja se mahdollistaa erittäin tarkan aineistojen syöttämisen ja mallintamisen. Toisaalta malli vaikuttaa edelleen keskeneräiseltä, vaativan useita tukiohjelmistoja ja sisältävän ainakin ArcMap-ympäristössä useita virheitä. Säädettyjen parametrien määrä on suuri, mikä vaikeuttaa oikeiden signaalien tunnistamista ja voi johtaa siihen, että eroosiota todellisuudessa säätelevät tekijät jäävät huomioimatta.</p> |                             |  |  |
| Avainsanat – Nyckelord – Keywords  |                             |  |  |
| Eroosio, valuma-alue, ilmastomuutos, SWAT, mallintaminen   |                             |  |  |
| Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited   |                             |  |  |
| Kumpulan tiedekirjasto, Helsinki & HELDA   |                             |  |  |
| Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information  |                             |  |  |

|  |                             |   |  |
|--|-----------------------------|---|--|
| Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty   |                             | Laitos/Institution– Department          |  |
| Faculty of Science   |                             | Department of Geosciences and Geography |  |
| Tekijä/Författare – Author   |                             |   |  |
| Viljami Arho Ilkanpoika Ruohonen   |                             |   |  |
| Työn nimi / Arbetets titel – Title   |                             |   |  |
| Modeling the effects of climate change on erosion in Southern Finland catchment using physically based SWAT-model  |                             |   |  |
| Oppiaine /Läroämne – Subject   |                             |   |  |
| Geography (physical geography)   |                             |   |  |
| Työn laji/Arbetets art – Level   | Aika/Datum – Month and year | Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages  |  |
| Master's thesis  | 7/2016                      | 69                                      |  |
| Tiivistelmä/Referat – Abstract   |                             |   |  |
| <p>Global climate change is predicted to have a major impact on northern temperate and arctic zones climates. Rainfall and temperatures are likely to increase in the future decades. Increasing erosion is one of the major threats linked to these phenomena. In Finland specifically, winter months are expected to face the most radical change in climate. This master's thesis aims to answer the following questions: how much does erosion increase in changing climate, what are the factors that either increase or control erosion rates, and how well does the physically based SWAT- model behave in the settings of Southern Finland.</p> <p>Two gauging stations inside the study area were used to calibrate and validate the physical SWAT- model (Härkälänjoki and the lower-part of Lepsämäenjoki). Total of 16 parameters controlling runoff were used. NS &amp; R<sup>2</sup> as well as P- &amp; R-factors were chosen to quantify and measure model behavior. In the calibration period, the R<sup>2</sup> &amp; NS values for Härkälänjoki were 0,29 and -0,05, and for Lepsämäenjoki 0,40 and 0,34. In the validation period, the R<sup>2</sup> &amp; NS values for Härkälänjoki were 0,30 and -0,57, and for Lepsämäenjoki 0,54 and 0,21. In the calibration period, the P &amp; R-values were 0,33 and 0,24 for Härkälänjoki and 0,32 and 0,29 for Lepsämäenjoki. In the validation period, the P &amp; R values were 0,42 and 0,57 for Härkälänjoki and 0,50 and 0,63 for Lepsämäenjoki. The results of R<sup>2</sup> and NS and the other criteria indicate that Lepsämäenjoki responded better to model calibration and validation, being satisfactory. Values for Härkälänjoki were generally unsatisfactory.</p> <p>The RCP8.5 scenario used in this thesis increases erosion by approx. 94% compared to the validation period. However, spatial variability is considerable. Average annual erosion in the climate change scenario was 1,22 t/ha. Winter months contribute most to the total annual erosion. Areas covered by evergreen forests and located near the edges of the study area experience least erosion, while areas near the downstream of the river experience the most erosion. SWAT model behaved reasonably well, and worked well with high-quality GIS data. However, the model still needs some further adjustment and development in order to have more consistent and user-friendly interface.</p> |                             |   |  |
| Avainsanat – Nyckelord – Keywords  |                             |   |  |
| Erosion, watershed, climate change, SWAT   |                             |   |  |
| Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited   |                             |   |  |
| Kumpula campus library, Helsinki & HELDA   |                             |   |  |
| Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information  |                             |   |  |

# Sisällysluettelo

|   |    |
|---|----|
| 1. Johdanto   | 1  |
| 2. Teoreettinen tausta                                  | 3  |
| 2.1 Eroosio   | 3  |
| 2.2 Suspensiossa oleva sedimentti ja siltaatio          | 6  |
| 2.3 Sedimentaatio                                       | 6  |
| 2.4 T-arvo  | 7  |
| 2.5 Aiempi tutkimus aiheesta                            | 7  |
| 3. Tutkimusalue   | 9  |
| 3.1 Sijainti ja yleiskuvas                              | 9  |
| 3.2 Maaperä   | 9  |
| 3.3 Maankäyttö ja maanpeite                             | 9  |
| 3.4 Sää, ilmasto ja hydrologia                          | 9  |
| 4. Aineistot ja menetelmät                              | 15 |
| 4.1 Paikkatietoaineistot                                | 15 |
| 4.2 Sää- ja ilmastoaineisto                             | 16 |
| 4.3 Ilmastonmuutosaineisto                              | 17 |
| 4.4 Virtaamatiedot                                      | 18 |
| 4.5 Eroosiomalleista yleisesti                          | 20 |
| 4.6 Tutkielmassa käytetty fysikaalinen malli            | 21 |
| 4.6.1 Hydrologinen kierto                               | 22 |
| 4.6.2 Eroosion mallinnukset teoria                      | 25 |
| 4.7 Mallin valmistelu                                   | 26 |
| 4.7.1 Maankäytön uudelleenluokittelu                    | 28 |
| 4.7.2 Maalajien ominaisuudet                            | 29 |
| 4.8 Kalibrointi ja validointi                           | 31 |
| 5. Tulokset   | 35 |
| 5.1 Sademäärät ja hydrologia                            | 35 |
| 5.2 Virtaama ja eroosio ennen kalibraatiota             | 35 |
| 5.3 Kalibroitu virtaama ja eroosio kalibraation jälkeen | 39 |

|   |    |
|---|----|
| 5.4 Virtaama ja eroosio validaation osalta        | 42 |
| 5.5 Ilmasto RCP8.5-skenaarion mukaan              | 45 |
| 5.6 Virtaama RCP8.5-skenaariossa                  | 45 |
| 5.7 Eroosion määrä RCP8.5 skenaariossa            | 46 |
| 5.8 Tulosten koonti                               | 48 |
| 6. Tulosten tarkastelu                            | 51 |
| 6.1 Ilmastonmuutoksen vaikutus eroosion määrään   | 51 |
| 6.2 Eroosio kontrolloivat tai kasvattavat tekijät | 52 |
| 6.3 SWAT-mallin käyttökelpoisuus                  | 53 |
| 6.4 Epävarmuuden lähteet                          | 54 |
| 6.4.1 Aineistojen virhelähteet                    | 54 |
| 6.4.2 Menetelmien virhelähteet                    | 55 |
| 6.5 Kehitysideat ja jatkotutkimus                 | 58 |
| 7. Johtopäätökset                                 | 59 |
| 8. Kirjallisuus                                   | 61 |
| Liitteet  | 67 |

# 1. Johdanto

Vuosi 2015 oli kaikkien aikojen lämpimin rikkoen aiemmat lämpöennätykset selvästi, ja 2011-2015 oli lämpimin koskaan mitattu viisivuotinen jakso (World Meteorological Organization 2016). Vuosien 1983-2012 välinen jakso oli luultavasti pohjoisen pallonpuoliskon lämpimin 1400 vuoteen (IPCC 2014). Edelleen IPCC:n (2014) mukaan ”Ihmisen vaikutus ilmastosysteemiin on selkeä... Viimeaikaisilla ilmastollisilla muutoksilla on ollut merkittäviä vaikutuksia sekä ihmisiin että luontoon”. Lisäksi vuonna 2000 annettiin EU:n vesipuitedirektiivi, jonka pääsisältönä oli pyrkimys suojella ja parantaa sisävesien vedenlaatua (Euroopan Unioni 2000). Tavoitteet asetettiin vuodelle 2015.

Ihmistoiminnan aikaansaama ilmastonmuutos on käynnissä nyt, ja sen yksi sen vaikutuksista on kasvava eroosio (IPCC 2007). Suomen näkökulmasta ilmiö on mielenkiintoinen, sillä tämän niin kutsutun globaalimuutoksen on ennustettu vaikuttavan tulevaisuudessa erityisesti pohjoisilla alueilla (ACIA 2005). Aiemmin talvikuukausien pakkanen ja veden sataminen lumena on hillinnyt näiden kuukausien eroosion määrää. Pohjoisen pallonpuoliskon lumipeite kuitenkin vähenee, ja yhä suurempi osa sateista tulee vetenä. Tämän seurauksena vesistöihin päättyy entistä enemmän kiintoainesta ja ravinteita.

Maaperän ja maanpinnan eroosio sekä sedimenttien kulkeutuminen vesistöihin on osa aineksen kiertoa maapallolla. Viime vuosikymmeninä voimistunut antropogeeninen toiminta ja ilmastonmuutos ovat kuitenkin lisänneet eroosion määrää (Nearing et al. 2005; Oyang et al. 2010). Tästä aiheutuu helposti haittoja eri spatiaalisilla ja temporaalisilla mittakaavoilla. Tyypillisiä kasvaneeseen eroosioon liitettäviä ongelmia ovat hedelmällisen maa-aineksen kulkeutuminen pois (Setegn et al. 2010) ja suurempifraktioisten partikkeleiden rikastuminen maan pinnalle (Mingthipol s.a.) sekä esimerkiksi uomien ja kanavien tukkeutuminen (Betrie et al. 2011), mistä seuraa usein ongelmia akvaattiselle eliöstölle (Zhang et al. 2009). Ilmatieteenlaitoksen (2011) mukaan myös Suomi kohtaa ilmastonmuutoksen myötä omat haasteensa erityisesti vesistöjen suojelussa eroosion kasvaessa.

Eroosion mittaaminen ja sedimentin lähtöalueen määrittely on pitkään ollut hankalaa ja työlästä. Siihen on liittynyt aikaa vieviä manuaalisia kokeita ja kömpelöitä sedimentin keräyslaitteita. Viime vuosina nopeasti kehittynyt tietokoneiden prosessointikyky ja

lisääntyneet ja tarkentuneet paikkatietoaineistot ovat mahdollistaneet uudenlaisen eroosion mallinuksen. SWAT (*Soil and And Water Assessment Tool*) on yksi vartenotettava vaihtoehto (Neitsch et al. 2011).

Korkeitten leveyspiirien alueiden oletetaan lämpenevän matalia ja keskileveitä alueita enemmän ja nopeammin. Suomi kuuluu näihin alueisiin, ja tutkimusta on tehty monipuolisesti liittyen lämpenevän ilmaston vaikutuksiin Suomessa (Ilmatieteenlaitos 2011). Myös eroosion oletetaan Suomessa selvästi kasvavan. Tutkimuskysymykset ovat:

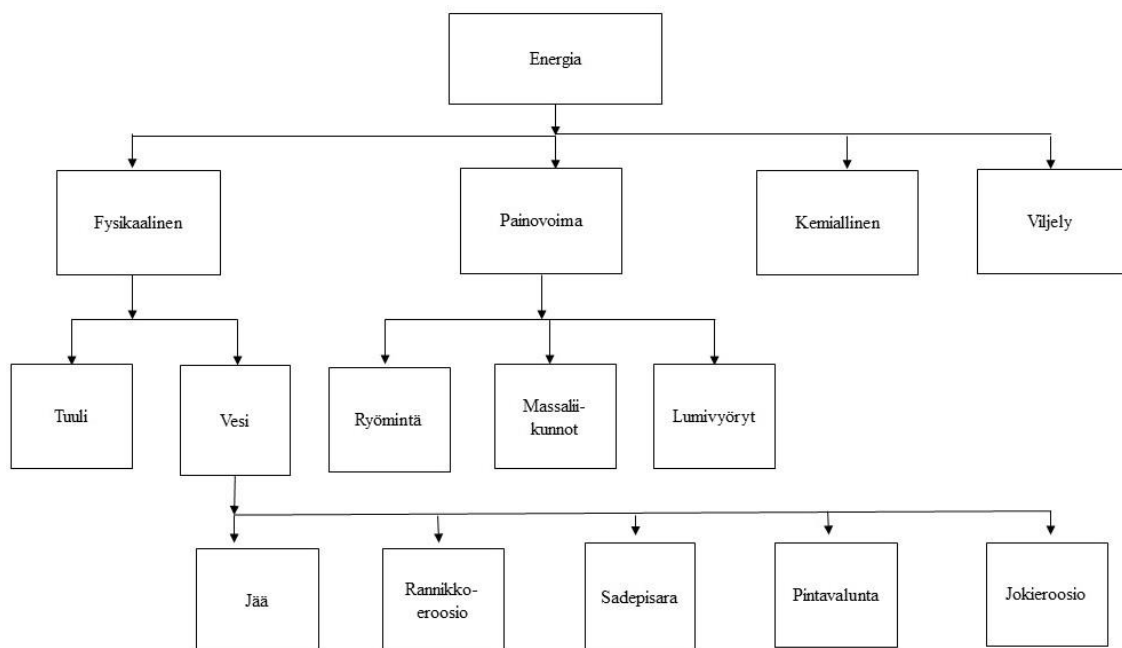
- A) Kuinka paljon lämpenevä ja muuttuva ilmasto vaikuttaa eroosion määrään verrattuna nykytasoon?
- B) Mitkä tekijät vaikuttavat lisäävästi tai hillitsevästi eroosion määrään muuttuvassa ilmastossa?
- C) Kuinka hyvin eroosiota voidaan mallintaa SWAT-mallilla suhteellisen yksinkertaisin paikkatietoaineistoin Suomessa?

Hypoteesi on, että ilmaston lämmetessä, sademäärien kasvaessa ja lumi- ja routajaksojen lyhentyessä eroosio kasvaa erityisesti talvikuukausina.

## 2. Teoreettinen tausta

### 2.1 Eroosio

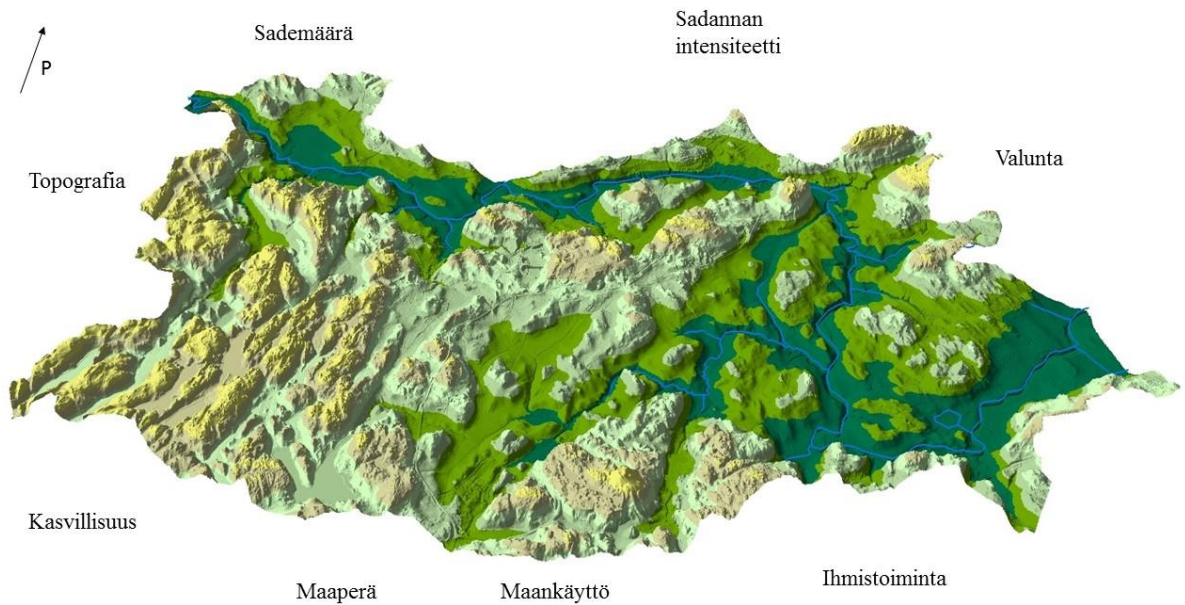
Eroosio prosessina voidaan määritellä partikkelin irtoamisena, kulkeutumisena ja lopulta kasaantumisenä jonkin kuljettavan voiman tai voimien vaikutuksesta (Jain & Kothyari 2000). Näitä voimia ovat mm. vesi, tuuli, painovoimavirtaukset tai jäätiköiden liikkeet (kuva 1) (Nichols 2009), mutta myös antropogeeninen eroosio on yleistä (Favis-Mortlock et al. 1997). Tässä tutkielmassa eroosiolla tarkoitetaan fysikaalista veden (sadepisarat, pintavalunta) aikaansaama aineksen irtautumista ja liikettä.



**Kuva 1.** Kaavakuva tavoista luokitella eroosiota lähtövoimien, eli energian, mukaan (muokattu Lal 2001). Aineksen irtautumista ja liikettä voi tapahtua monin tavoin. Eroosio voi olla hidasta, esimerkiksi kemiallinen eroosio, tai äkkinäistä kuten massaliikunnot. Tässä tutkielmassa eroosiolla tarkoitetaan käytännössä aina vesieroosiota ja lähtökohtaisesti nimenomaan sadepisaran tai pintavalunnan aikaansaamaa aineksen liikettä.

Eroosion määrä ja voimakkuus ovat vahvasti riippuvaisia paitsi sateen ja valunnan määrästä ja intensiteetistä, myös maaperän ominaisuuksista, kasvillisuudesta ja topografiasta (kuva 2) (Jain & Kothyari 2000). Eroosio on jatkuva ilmiö. Partikkeli voi käydä läpi useita eroosio- kasaantumissyklejä ennen ”lopullista” asettumistaan ja sedimentoitumistaan (kuva 3) (Nichols 2009).





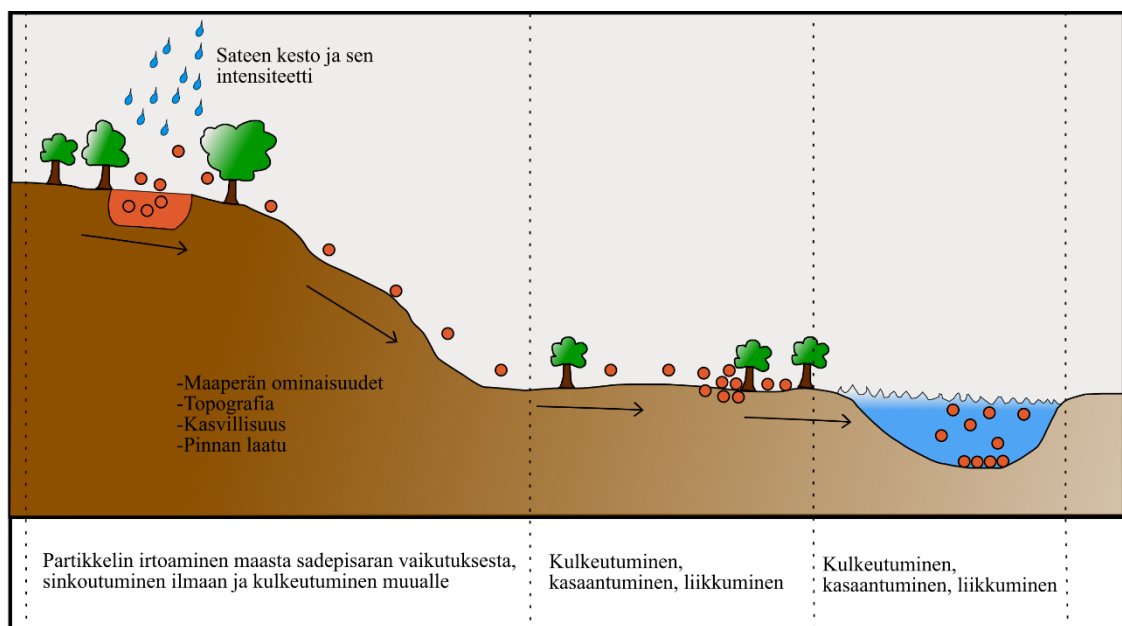
**Kuva 2.** Kaavakuva keskeisesti vesieroosion määrään vaikuttavista tekijöistä valuma-alueella. Eri tekijät voivat olla joko eroosiota lisääviä tai sitä hillitseviä. Esimerkiksi kasvillisuus sekä suojaa maata iskeytyvältä vesipisaralta (kuva 3) että hillitsee maaperän liikettä muualle juurien sitovan voiman ansiosta. Ihmistoiminnan koetaan lisäävän eroosiota mm. metsähakkuiden yhteydessä, mutta toisaalta suojakaistaleet peltojen ympärillä vähentävät uomiin kulkeutuvan aineksen määrää. (Liioiteltu 3D-korkeusmalli tutkimusalueen osavaluma-alueelta.) (Jain & Kothyary 2000; Maanmittauslaitos 2016)

Eroosion määrä, luonne ja nopeus vaihtelevat eri spatiaalisilla ja temporaalisilla skaaloilla. Jos tarkastellaan hyvin pienen alueen eroosiota lyhyellä aika-askeleella, siihen luultavasti eniten vaikuttava tekijä on sadepisaroiden iskeytymisvoima, sillä varsinaista pintavaluntaa tai pinnan pienipiirteistä uomastoa ei ehdi muodostua (Morgan & Nearing 2011). Aines irtautuu maaperästä sadepisaran iskusta ja liikkuu rinnettä alaspäin. Toisaalta pienenkin alueen sisällä sadannassa, sen määrässä ja intensiteetissä vai tapahtua suuria vaihteluita, jotka eivät välttämättä korreloi keskenään lainkaan.

Mesotason skaalalla, esimerkiksi valuma-alueella tai hallinnollisesti rajatulla alueella, sadannan määrän ja ajoittumisen lisäksi eroosiota määrittäväksi tekijäksi muodostuvat laajemmin maaperä, maankäyttö, (pinta)valunta, maaperän kosteus ja aiemmat eroosiota ja aineksen liikettä mahdollisesti edistävät tekijät (Morgan & Nearing 2011). Niitä voivat olla kuivuus ja samanaikainen karjatalous, mitkä rikkovat maan pintaosaa, jo olemassa olevien pienten uomien olemassaolo, savimaiden rakoilu tai ihmistoiminta joko edistävässä tai ehkäisevässä muodossa.

Jos tarkasteltava alue on suuri, mutta tarkastelutason resoluutio liian karkea, aineksen liikettä arvioidessa voidaan kohdata ainakin kaksi toisiinsa liittyvää ilmiötä (Morgan & Nearing 2011). Ensinnäkin viljelyalueelta uomaan ja sitä kautta valuma-alueelta pois liikkuvan sedimentin määrä voi vaihdella päivä- kuukausi- tai vuositasolla paljonkin. Tätä liikettä ja muutosta voidaan eri menetelmin mitata ja arvioida. Toiseksi usein kuitenkin pellolla tapahtuvan aineksen irtautuminen ja kulkeutuminen johtavat lähinnä vain saman aineksen uudelleenkasaantumiseen lähelle sen lähtöaluetta, jolloin eroosio kokonaisvaltaisena prosessina jää huomioimatta. Aineksen liike ei näy tarkasteltavassa mittakaavassa.

Tarkasteltaessa eroosiota makrotasolla ehkä tärkeimmät muuttujat ovat litologia, ilmasto ja suurpiirteinen kasvillisuus yhdessä ihmistoiminnan laaja-alaisen vaikutuksen kanssa (Morgan & Nearing 2011). Tällä tasolla liikutaan yleensä maa- tai mannerskaalassa. Suuren mittakaavatason tarkastelussa ja usein sitä seuraavassa päätöksenteossa aineksen liikkeen tai eroosion absoluuttisilla määrillä ei enää ole yhtä suurta painoarvoa kuin



**Kuva 3.** Yksinkertaistettu kuva siitä, miten vesi irrottaa ja kuljettaa ainesta (Nichols 2009). Sataessa vesipisaroita iskeytyy maanpintaan ja nostaa niitä ilmaan. Mitä jyrkempi rinne, sitä kauemmaksi alkuperäisestä paikastaan partikkeli laskeutuu. Tämä yhdessä pinnalla valuvan veden kanssa kuljettaa partikkeleita muualle niiden lähtöalueilta. Kasautumisalueet sijaitsevat yleensä alavilla alueilla tai muuten aineksen liikkumista estävillä alueilla (esimerkiksi kasvillisuus). Joet sekä kuljettavat ainesta kauemmaksi, että toimivat kasaantumipaikkoina. Yleensä nämä prosessit toimivat samanaikaisesti.

pienemmän tason tarkastelussa. Tärkeämmäksi kysymykseksi nousevat riskit, kustannukset, ehkäisytöimenpiteet ja paikallistason integrointi. Eroosio saa siis uuden näkökulman, joka ei sinänsä liity enää fysikaalisiin prosesseihin vaan mielikuviin ja laajempaan ympäristökontekstiin.

Eroosio ei myöskään ole vakio ajallisesti ajateltuna (Morgan & Nearing 2011). Alueella kuin alueella on ajanjaksoja, jolloin aineksen liike on suurempaa kuin muina jaksoina. Vuoden tai vuosien keskiarvot voivat olla lähellä toisiaan, mutta äkkinäiset massaliikunnot esimerkiksi savimailla voivat hetkessä siirtää monin verroin enemmän ainesta valuma-alueen uomastoon kuin aika-askeleella keskimäärin. Tällä on mittavia lyhyen ja keskipitkän vaikutuksia.

## **2.2 Suspensiossa oleva sedimentti ja siltaatio**

Suspensiolla tarkoitetaan virtauksessa olevan turbulenssin aikaansaamaa ylöspäin suuntautuvaa liikettä, joka pitää partikkelit liikkeessä (Nichols 2009). Suspensiossa oleva sedimentti koostuu pienistä orgaanisista (EPA 2012) tai epäorgaanisista siltti- ja savipartikkeleista jotka pysyvät virtaavassa vedessä suspensiossa veden turbulenssin takia (Tarvainen et al. 2005). Sedimentoituminen voi tapahtua vain silloin, kun veden virtausnopeus laskee tai kun joki laskee suurempaan vesialtaaseen (FAO 1995). EPA:n (United States Environmental Protection Agency) (2012) määritelmän mukaan suspensiossa olevat partikkelit voidaan poistaa suodattamalla.

Siltaatiolla tarkoitetaan kahta eri asiaa riippuen kontekstista. Sillä voidaan viitata joko suspensiossa olevan hienoaineksen määrään tai hienoaineksen kasaantumiseen vesimassan pohjalle (Tynes Rivers Trust 2012). Siltaatiota aiheuttavat partikkelit ovat pieniä (0,002 – 0,06 mm), yleensä silttiä, savea tai hiekkaa (Atkinson s.a.) ja peräisin esimerkiksi metsähakkuista (Cortés & Risk 1985). Siltaatio alkaa varsinaisesti vasta sitten, kun hienoaineksen määrä on liiallinen (FAO 1983). Tämä määritelmä tekee siltaation havaitsemisesta ja siihen mahdollisesti puuttumisesta hankalaa, sillä erilaisissa vesiympäristöissä ja erilaisilla alueilla suspensiossa olevan ja kasautuvan hienoaineksen määrä vaihtelee luonnollisesti paljon (Tynes Rivers Trust 2012).

## **2.3 Sedimentaatio**

Sedimentaatio tai sedimentoituminen liittyy läheisesti eroosioon. Yksinkertaistettuna se on eroosion lopputuote. Sedimentin muodostuminen edellyttää ensin eroosiota ja

kuljetusta. Lisäksi sedimentaatiota voi aiheuttaa kemiallinen tai biologinen aineksen lisääntyminen sedimentaatiopaikalla (Nichols 2009). Sedimentoituva materiaali itsessään koostuu mistä tahansa orgaanisesta tai epäorgaanisesta aineksesta joka voi kulkeutua edellä mainituin tavoin (Kemker 2014).

## 2.4 T-arvo

T-arvo (*tolerable soil loss* tai *soil loss tolerance*) tarkoittaa eroosion määrää, mikä ei ylitä maaperän luontaista muodostumisnopeutta (Hurni 1983; Bazzoffi 2009). Jo 1600-luvulla amerikkalaiset maanviljelijät kiinnittivät huomiota eroosioon ja sen aiheuttamiin ongelmiin ja yrittivät kehittää tapoja viljelysmaidensa maaperän suojeluun (Smith & Stamey 1965). Vasta 1900-luvulla tähän ongelmaan herättiin toden teolla, ja nykyään USA:lla on määritellyt T-arvot, jotka vaihtelevat välillä 5-12 t/ha (Montgomery 2007). Myös Euroopan Unioni on yrittänyt määrittellä hyväksyttävää eroosion määrää (mm. Grimm et al. 2002; Verheijen et al. 2009; Panagos et al. 2015). Toistaiseksi yleisesti hyväksytyjä rajoja ei ilmeisesti ole.

T-arvo liitetään usein maanviljelyyn, ja niinpä tarkemman määrittelyn mukaan hyväksyttävä T-arvo on ”maaperän suurin mahdollinen häviämisen määrä, joka vielä mahdollistaa sadon ekonomisen tuottavuuden loputtomasti” (ESRI 2015). T-arvo on sitä pienempi, mitä hitaammin maaperä uusiutuu eli tuottaa uutta maakerrosta (Vis 1987).

## 2.5 Aiempi tutkimus aiheesta

Suomessa eroosiotutkimus on keskittynyt maan etelä- ja länsiosiin. Mansikkaniemi (1982) tutki yhdeksää vaihtelevan kokoista valuma-aluetta Paimionjoen ympäristössä ja havaitsi, että keskimääräinen eroosio vaihtelee sademääristä riippuen 70 ja 560 tonnin välillä neliökilometrillä, keskiarvon ollen noin 50 t/km<sup>2</sup>. Talvikuukausien osuus aineksen liikkeestä oli 20%. Savo et al. (1985) tekivät eroosiotutkimusta Lappväärtinjoen ja Hyypänjoen valuma-alueista. Tulokset ovat melko kuvailevia ja perustuvat karttaruutujen pisteytykseen maankäytön, maaperän, reliefin ja rakennetun alan osalta. Lilja et al. (2014) tekivät karttapohjaisen selvityksen Suomen peltojen eroosioherkkyydestä käyttäen RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Model*) -mallia ja laserkeilausaineistoja. Tuloksista käy ilmi, että Etelä-Suomi on muuta maata alttiimpi eroosiolle. Puustinen et al. (2006) havaitsivat eroosion vaihtelevan eteläisessä Suomessa 0,2-6 t/ha välillä vuodessa.

Fysikaalisella SWAT-mallilla tehtävän mallinnuksen ja tutkimuksen määrä on maailmanlaajuisesti kasvanut viime vuosina (White et al. 2012). USA:ssa ilmastonmuutoksen vaikutuksia eroosioon ovat tutkineet mm. Nearing (2001), Pruski & Nearing (2002) ja Zhang & Nearing (2005). Sekä sateen erosionaalinen voima, että eroosio kasvavat heidän mukaansa. Samanlaisiin johtopäätöksiin päätyivät myös Michael et al. (2005) Saksassa ja Zhang et al. (2005) Kiinassa.

Suomessa SWAT-mallia ovat käyttäneet ainakin Grizzetti et al. (2003), Bärlund et al. (2007), Tattari et al. (2009) ja Koskiahho et al. (2013). Tutkimukset ovat keskittyneet Etelä-Suomen valuma-alueisiin ja niiden keskipisteenä on ollut lähinnä vesistöihin päätyvien ravinteiden määrittäminen sekä yleinen vedenlaadun analysointi. Bouraoui et al. (2007) selvittivät SWAT:lla ilmastonmuutoksen vaikutuksia veden kiertoon ja ravinteiden häviämiseen eteläsuomalaisessa valuma-alueessa. Heidän tulostensa mukaan suspensiossa olevan sedimentin määrä nousi ilmaston lämmetessä.

### **3. Tutkimusalue**

#### **3.1 Sijainti ja yleiskuvaus**

Tutkimusalue sijaitsee Etelä-Suomessa, hieman Nurmijärven kaupungista lounaaseen (kuva 4). Alueen keskikoordinaatti sijaitsee noin pituuspiirin 24°37' ja leveyspiirin 60°22' risteyskohdassa. Tutkimusalueen koko on noin 204 neliökilometriä. Lepsämänjoen 2. jakovaiheen vesistöalue jaetaan Suomen ympäristökeskuksen luokittelussa kahdeksaan pienempään valuma-alueeseen. Johtuen kuitenkin Aineisto ja menetelmät- osiossa esitetyistä syistä, lopullinen valuma-aluejako sisältää huomattavasti useampia valuma-alueita. Korkeussuhteet ovat melko maltillisia. Tutkimusalueen maastonkorkeus vaihtelee 26 ja 127 metrin välillä merenpinnasta. Keskikorkeus on noin 65 metrin korkeudella. Alavimmat alueet sijoittuvat yleisesti ottaen tutkimusalueen itäosiin ja korkeimmat luoteis- ja lounaisosiin.

#### **3.2 Maalajit**

Maalajeiltaan tutkimusalue on tyypillisen eteläsuomalainen ja kokonaisuutena melko kaksijakoinen (kuva 5, taulukko 2). Pienipiirteistä mosaiikkia on paljon, ja maalajite voi vaihdella pienellä matkalla hyvinkin paljon. Itä-koillisosaa dominoi savimuodostumat, länsi-lounaisosaa melko yhtäjaksoinen kalliomaan alue. Hiekkamoreenia esiintyy kalliomaiden ympärillä ja erityisesti tutkimusalueen luoteisosassa. Maalajit valuma-alueittain on esitetty liitteessä 3.

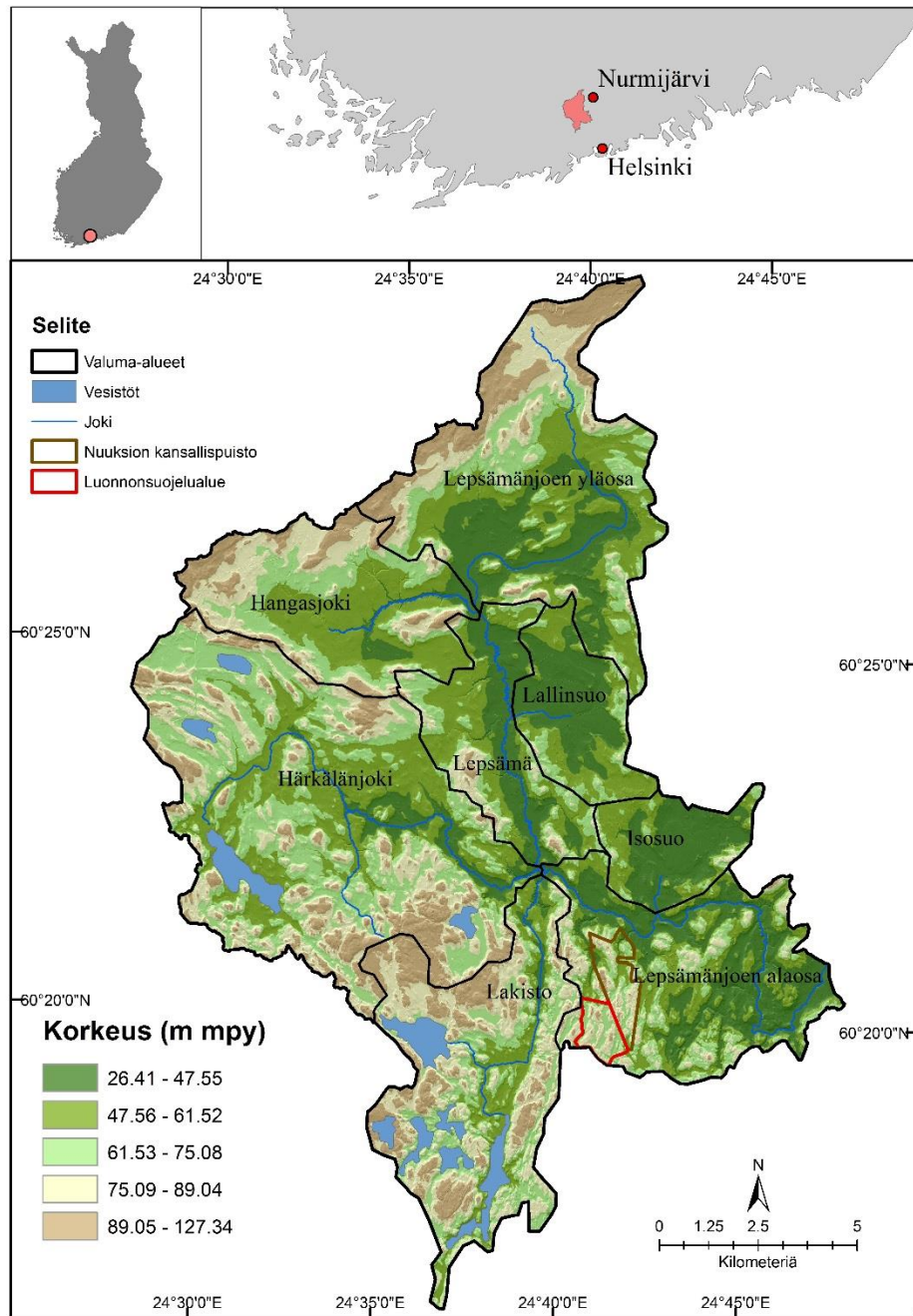
#### **3.3 Maankäyttö ja maanpeite**

Maapeite ja maankäytön muodot ovat vaihtelevia (kuva 6, taulukko 2). Savivaltaisia alueita on valjastettu maatalouden käyttöön, lounaisosan metsäalueet kuuluvat osin Nuuksion kansallispuistoon ja luonnonsuojelualueisiin. Tutkimusalueella on myös muutamia suoalueita. Suurimmat asutuskeskittymät ovat kuvassa 4 merkityt paikat. Lepsämän kylä on niistä suurin. Liite 2 näyttää maankäytön ja -peitteen valuma-alueittain.

#### **3.4 Sää, ilmasto ja hydrologia**

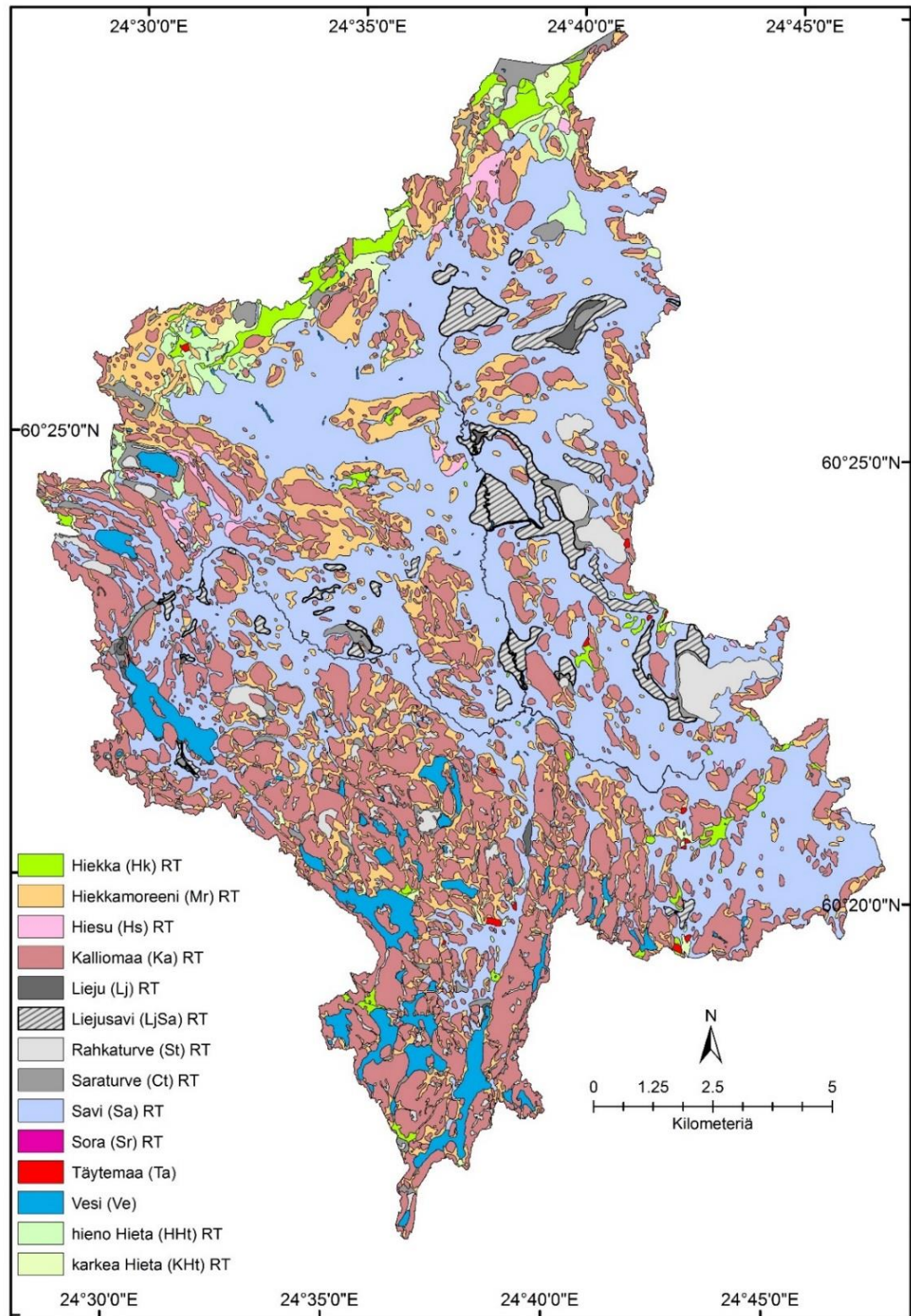
Köppenin ilmastoluokituksessa Lepsämänjoen vesistöalue kuuluu muun Etelä-Suomen tavoin luokkaan Dfc (kostea, kylmä- muttei ankaratalvinen, lyhytkestävä ilmasto) (Kottek et al. 2006; Räisänen ja Heino 2008). Jos aluetta tarkastellaan tarkemmin

fytogeografisen luokittelun näkökulmasta, kuuluu alue joko hemi- tai eteläboreaaliseen vyöhykkeeseen (Käyhkö 2014). Tärkeimmät kuukausittaiset alueen ilmastoon ja sähään liittyvät luvut on esitetty taulukossa 1.



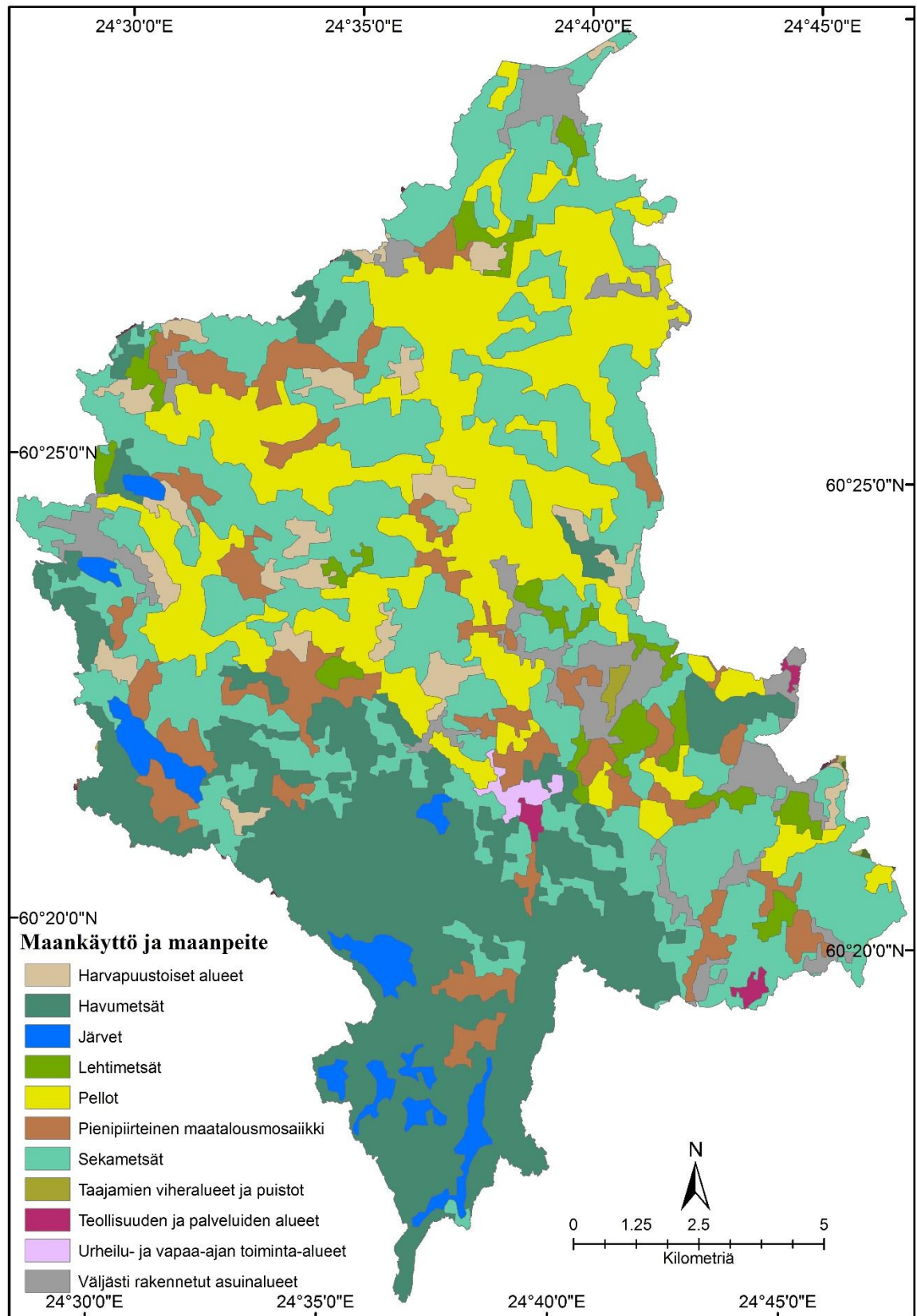
**Kuva 4.** Tutkimusalueen sijainti Suomessa, korkeussuhteet, valuma-alueet ja paikannimistö. Suurin osa tutkimusalueesta on matalasti kumpuilevaa, korkeammat alueet muodostavat pääasiassa valuma-alueiden ja koko vesistöalueen rajat. Pinta-ala on noin 204 km<sup>2</sup>. (SYKE 2014; Maanmittauslaitos 2016)





**Kuva 5.** Maalajeiltaan tutkimusalue on kaksijakoinen. Savi ja kalliomaa peittävät tutkimusalueesta eniten. Hiekkamoreenia on kallioiden alueiden ympärillä ja alueen luoteisosassa, missä sijaitsevat myös suurimmat hiekkavaltaiset alueet. (GTK 2012)





**Kuva 6.** Maanpeite/ -käyttö tutkimusalueella. Pohjoisosassa sijaitsevat laajimmat yhtenäiset peltoalueet. Niiden ympärillä on erilaisia ja eri-ikäisiä sekametsiä sekä muuta maataloutta. Yhtenäisiä metsäalueita on tutkimusalueen eteläosassa. (SYKE 2014)

**Taulukko 1.** Hyvinkään Mutilan asemalta mitattuja kuukausittaisia arvoja vuosilta 1971-2000 (Ilmatieteenlaitos 2009). Lämpötila- ja sademäärälukemat ovat tyypillisen eteläsuomalaisia. Vuoden keskilämpötila on noin 4,3 C° ja keskimääräinen sademäärä noin 647 millimetriä.

| kk           | C° ka      | C° ylin    | C° alin     | Kuukausisade ka (mm) | Pakkaspäiviä | Hellepäiviä | Lumi 15.pv. |
|--------------|------------|------------|-------------|----------------------|--------------|-------------|-------------|
| 1            | -6,1       | -3,3       | -9,7        | 49                   | 28           | 0           | 21          |
| 2            | -6,6       | -3,3       | -10,7       | 37                   | 26           | 0           | 32          |
| 3            | -2,8       | 1,3        | -6,7        | 39                   | 27           | 0           | 32          |
| 4            | 2,9        | 7,5        | -1,5        | 35                   | 19           | 0           | 6           |
| 5            | 9,8        | 15,5       | 3,2         | 33                   | 7            | 1           | 0           |
| 6            | 14,4       | 19,8       | 8           | 55                   | 0            | 4           | 0           |
| 7            | 16,4       | 21,7       | 10,5        | 75                   | 0            | 6           | 0           |
| 8            | 14,6       | 19,7       | 9,4         | 78                   | 0            | 4           | 0           |
| 9            | 9,3        | 13,7       | 5           | 63                   | 4            | 0           | 0           |
| 10           | 4,4        | 7,6        | 1,4         | 66                   | 12           | 0           | 0           |
| 11           | -0,6       | 1,9        | -3,2        | 64                   | 20           | 0           | 2           |
| 12           | -4,1       | -1,6       | -7,6        | 55                   | 26           | 0           | 10          |
| <b>Vuosi</b> | <b>4,3</b> | <b>8,4</b> | <b>-0,2</b> | <b>647</b>           | <b>169</b>   | <b>15</b>   |             |

Merkittävin alueen ilmastoon vaikuttava tekijä on Suomenlahti (Ilmatieteenlaitos 2009). Keväällä ja alkukesästä se alentaa lämpötiloja, ja vastaavasti syksyllä ja alkutalvesta siirtää pakkaspäivien ajankohtaa ja määrää myöhemmäksi. Vaikutus näkyy myös lumen määrässä ja pysyvän lumipeitteen alkamisajankohdassa. Keskimäärin pysyvän lumipeitteen ajankohta Nurmijärvellä, tutkimusalueesta hieman koilliseen, oli 8. joulukuuta.

Hydrologian kannalta haihtuminen on suurinta kesäkuukausina, jolloin myös jokien virtaama on kaikkein alhaisimmillaan. Syksyllä matalapaineet tuovat lounaasta sateita ja saavat aikaan virtaamapiikkejä. Pysyvien pakkasjaksojen aikana ja lumen sataessa virtaama jälleen laskee, kunnes kevään lämpötilojen nousu ja lumen sulaminen nostavat jokien virtaamat huippuunsa. Sateisimmat kuukaudet sijoittuvat heinä-lokakuulle.

**Taulukko 2.** Tutkimusalueen maankäyttö ja maalajit. Vallitsevat maankäytön muodot ovat erilaiset maatalouden muodot sekä metsät. Vastaavasti maalajeista tutkimusaluetta hallitsevat savi- ja kalliomaat.

| Kuvaus                                     | A (km <sup>2</sup> ) | %     | Kuvaus          | A (km <sup>2</sup> ) | %     |
|--|----------------------|-------|-----------------|----------------------|-------|
| Pellot                                     | 41,39                | 20,32 | Hiekka          | 3,88                 | 1,90  |
| Pienipiirteinen<br>maatalousmosaiikki      | 17,82                | 8,75  | Hiekkamoreeni   | 27,29                | 13,39 |
| Harvapuustoiset<br>alueet                  | 7,74                 | 3,80  | Hieno hieta     | 2,78                 | 1,36  |
| Lehtimetsät                                | 6,31                 | 3,09  | Hiesu           | 1,76                 | 0,86  |
| Havumetsät                                 | 47,54                | 23,33 | Kalliomaa       | 59,31                | 29,08 |
| Sekametsät                                 | 65,25                | 32,03 | Karkea hieta    | 2,98                 | 1,46  |
| Taajamien<br>viheralueet ja<br>puistot     | 0,29                 | 0,14  | Lieju           | 0,62                 | 0,30  |
| Urheilu- ja vapaa-<br>ajan toiminta-alueet | 0,74                 | 0,36  | Liejusavi       | 6,96                 | 3,41  |
| Väljästi rakennetut<br>asuinalueet         | 10,30                | 5,06  | Rahkaturve      | 5,46                 | 2,68  |
| Teollisuuden ja<br>palveluiden alueet      | 0,63                 | 0,31  | Saraturve       | 4,76                 | 2,33  |
| Järvet                                     | 5,70                 | 2,79  | Savi            | 80,54                | 39,49 |
| <b>Yhteensä</b>                            | <b>203,71</b>        |       | Sora            | 0,002                | 0,001 |
|  |                      |       | Täytemaa        | 0,21                 | 0,10  |
|  |                      |       | Vesi            | 7,34                 | 3,59  |
|  |                      |       | <b>Yhteensä</b> | <b>203,91</b>        |       |

## 4. Aineistot ja menetelmät

### 4.1 Paikkatietoaineistot

Aineistot koostuvat eri lähteistä ladatuista paikkatietoaineistoista (taulukko 3). Aineistot ovat ilmaisia ja spatiaalisesti tarkkoja, joten aineistojen muokkaus oli pientä. Käytetty koordinaatisto on ETRS-TM35FIN.

**Taulukko 3.** Käytetyt paikkatietoaineistot ja niiden tarjoaja. Aineistot ovat käytännössä kaikki paikkatietoaineistoja ja saatavilla ilmaiseksi erilaisista paikkatietoportaaleista tai -palveluista. Aineistot ovat sekä tuoreita että laadultaan tarkkoja.

| Aineisto                  | Muoto    | Aineiston tarjoaja   |
|---------------------------|----------|--|
| Digitaalinen korkeusmalli | Rasteri  | Maanmittauslaitos (2016)                                     |
| Maalajit                  | Vektori  | GTK (2012), WFS-rajapintapalvelu                             |
| Maakäyttö/maanpeite       | Vektori  | SYKE (2014)  |
| Valuma-alueet             | Vektori  | SYKE (2016)  |
| Uomat                     | Vektori  | SYKE (2016)  |
| Sää ja ilmasto            | Taulukko | Ilmatieteenlaitos (2009); NCEP & Texas A&M University (2014) |

Maanmittauslaitoksen tuottama digitaalinen korkeusmalli on resoluutioltaan kaksi metriä ja perustuu laserkeilauksella tuotettuun aineistoon. Sen pistetiheys on vähintään 0,5 pistettä neliökilometrillä. MML:n laatuluokituksessa se kuuluu luokkaan I, eli sen korkeustarkkuus on keskimäärin 0,3 metriä.

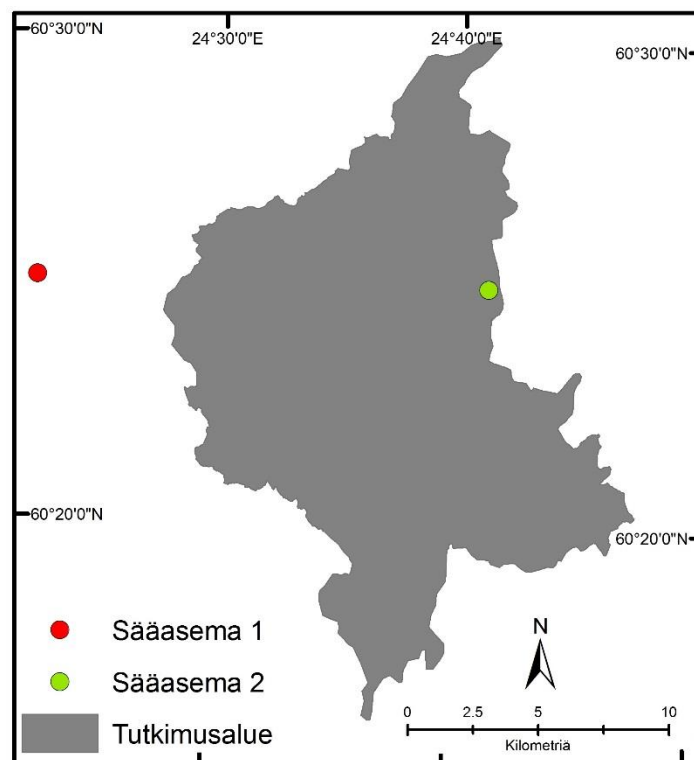
Geologian tutkimuskeskuksen ylläpitämä WFS- rajapintapalvelu (*Web Feature Service*) mahdollisti tarkan maaperäaineiston käyttämisen. Se koostuu vuosilta 1972-2006 kartoitetusta maaperäaineistosta, joka on muunnettu digitaaliseen muotoon. Ladatusta vektoriaineistosta valittiin mallinnukseen käytettäväksi pintamaalajit.

Maankäyttö ja -peiteaineisto perustuu Suomen ympäristökeskuksen Corine 2012-vektoriaineistoon. CLC2012 kuvaa koko Suomen maankäyttöä ja maanpeitettä vuonna 2012. Pienin maastossa erottuva alue on vähintään 25 hehtaaria ja kapeimmillaan 100 metriä. Pääluokkia on viisi, ja tutkielmassa käytetyssä kolmannessa luokittelutasossa ne jaetaan yhteensä 44 alaluokkaan. Uomat ja valuma-alueet ladattiin SYKE:n Hertta-

tietokannasta. Uomia tarkennettiin tai jatkettiin mallinnusvaiheessa tapauskohtaisesti ilmakuvien ja korkeusmallin perusteella ja/tai SWAT-mallin ehdottamalla tavalla.

#### 4.2 Sää- ja ilmastoaineisto

Sää- ja ilmastoaineisto on peräisin SWAT-mallin kotisivuilta. Sen tuottaja on NCEP (*National Centers for Environmental Protection*) ja se perustuu vuosien 1979-2014 aikana kerättyyn dataan. Tutkimusalueen lähistöltä sijaitsi kaksi sääasemaa, joille ja joilta aineistoa oli saatavilla (kuva 7). NCEP:n aineisto kuitenkin selkeästi yliarvioi kuukausittaisen ja vuosittaisen sadannan määrää. Suurimmillaan yliarviot olivat jopa lähes 50%, joten arvoja pienennettiin manuaalisesti vastaamaan lähemmin taulukossa 1 esitettyjä jakson 1970-2000 lukemia. Lämpötilat vastasivat NCEP:n aineistossa hyvin Suomessa mitattuja arvoja.



**Kuva 7.** Käytettyjen sääasemien sijainti suhteessa tutkimusalueeseen. Tutkimusalueen ollessa alaltaan suhteellisen pieni, kattavamman aineiston käyttö ei ollut välttämätöntä. Tutkielmassa myöhemmin esiteltävät osavaluma-alueet ja HRU:t ottavat sää- ja ilmastotietonsa lähimpänä olevasta sääasemasta (Neitsch et al. 2011)

Aineisto on taulukkomuotoinen, ja sisältää arvoja sademääristä, lämpötiloista, Auringon säteilyn määrästä ja tuulen nopeudesta. Tiedot on esitetyt tarkemmin liitteessä 1.

### 4.3 Ilmastonmuutosaineisto

Ilmastonmuutosskenaarioita ja malleja on paljon, ja ne myös tarkentuvat vuosi vuodelta. Ennusteet ovat tarkimpia lähellä nykyhetkeä. Epävarmuusväli kasvaa mitä kauemmaksi tulevaisuuteen ennusteita tehdään. Tutkimuskysymyksiä ratkomaan valittiin vuonna 2008 WCRP:n (*World Climate Research Programme*) johdolla aloitettu hanke, jonka kulminaationa tuotettiin uusi CMIP5- (*Coupled Model Intercomparison Project*) ennuste. Ilmatieteenlaitos (2014) seuroi 35:stä CMIP5- ennusteesta seitsemän parhaiten Suomea koskevaa ennustetta, joista RCP8.5 valikoitui tähän tutkielmaan.

Ennusteista RCP8.5 (*Representative Concentration Pathway*) on kaikkein dramaattisin. Ihmisen aiheuttama ilmastonmuutos tulee jatkumaan vähintään nykyisenlaisena, ja päästöt pikemminkin kasvavat kuin pysyvät nykyisenlaisena tai vähentyvät. Hiilidioksidipäästöt kolminkertaistuvat vuoteen 2100 mennessä, ollen yli kolminkertaiset verrattuna esiteolliseen aikaan. Myös metaanipäästöt kasvavat RCP8.5-ennusteessa kaikkein jyrkimmin. Globaalisti lämpötilat keskimäärin kasvaisivat yli 4 °C verrattuna aikaan ennen teollistumista.

Suomessa sekä lämpötila että sademäärät kasvaisivat selvästi verrattuna nykytasoon huolimatta siitä, mitä ennustetta käytettäisiin. Tämä on ollut myös monen muun ilmastonmuutosta tutkineen julkaisun tulos; Pohjolan ilmasto muuttuu keskimääräistä enemmän ja selkeämmin. RCP8.5-ennusteessa vuoden keskimääräinen sademäärä kasvaisi jopa 20%. Lämpötiloissa todettaisiin peräti kahdeksan asteen kohoaminen.

Yleinen mielipide on myös se, että talvikuukausina Suomessa havaittaisiin selkeästi suurempi muutos verrattuna kesäkuukausiin. Tammikuun lämpötilat kasvaisivat jopa 4-12 °C, todennäköisimmän ja tässä tutkimuksessa käytetyn arvion mukaan noin 8 °C. Vastaava trendi olisi odotettavissa myös sateiden osalta. Tarkemmin mallinnuksessa käytettyä ennustetta eri kuukausien osalta on havainnollistettu taulukossa 4.

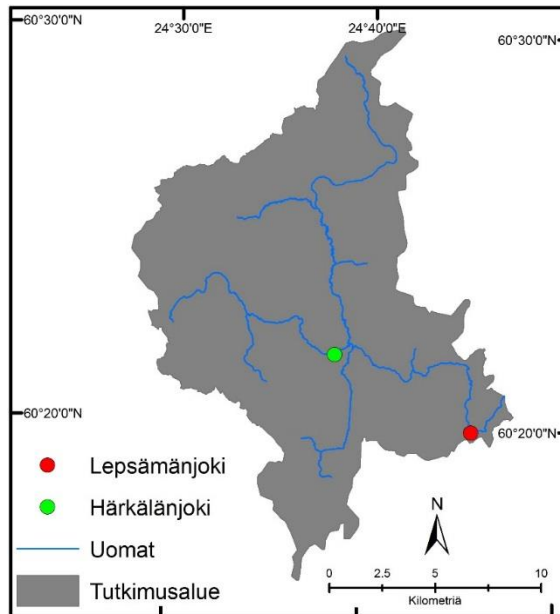
**Taulukko 4.** Mallinnuksessa käytetyn RCP8.5-ennusteen kuukausittaiset muutokset lämpötilassa ja sademäärissä. Ennustetta voidaan pitää kaikkein dramaattisimpana ilmastonmuutosskenaariona, jossa sekä lämpötila että sademäärät kasvavat kaikkein eniten varsinkin pohjoisella pallonpuoliskolla. Valitut arvot edustavat vaihteluvälin kaikkein todennäköisimpiä arvoja.

| Kuukausi  | Lämpötilan kasvu (°C) | Sademäärän muutos (%) |
|-----------|-----------------------|-----------------------|
| Tammikuu  | 8,0                   | 36                    |
| Helmikuu  | 7,5                   | 28                    |
| Maaliskuu | 6,3                   | 25                    |
| Huhtikuu  | 5,9                   | 19                    |
| Toukokuu  | 5,1                   | 20                    |
| Kesäkuu   | 4,9                   | 15                    |
| Heinäkuu  | 5,0                   | 10                    |
| Elokuu    | 5,1                   | 8                     |
| Syyskuu   | 5,1                   | 12                    |
| Lokakuu   | 5,3                   | 21                    |
| Marraskuu | 6,5                   | 28                    |
| Joulukuu  | 7,4                   | 29                    |

#### 4.4 Virtaamatiedot

Mallin kalibrointiin ja validointiin käytettiin virtaamatietoa kahden eri joen varrelta tutkimusalueen sisältä. Härkälänjoen ja Lepsämänjoen alaosan mittauspaikkojen sijainti ja koordinaatit on esitetty kuvassa 8. Virtaamatiedot ladattiin Suomen ympäristökeskuksen Hertta-tietokannasta (2016).

Mittaustuloksia on satunnaisesti Lepsämänjoen alaosan osalta vuodesta 2002 vuoteen 2016 ja Härkälänjoen osalta vuodesta 1971 vuoteen 2016. Mittaukset ovat kuitenkin näiltä vuosilta osin melko hajanaisia, joten kalibrointia ja validointia varten valittiin kaikkein ehein mittausjakso. Se kattaa vuodet 2007-2014. Päivittäiset mittaukset muutettiin kuukausien keskiarvoiksi. Ne kuukaudet, joilta mittauksia oli vähän tai ei ollenkaan, poistettiin kalibraatio- ja validaatiovaiheesta tai niitä korvaamaan käytettiin muiden vuosien kuukausien mittauksien keskiarvoa. Härkälänjoelle mittauksia tuli 84 ja Lepsämänjoelle 81 kappaletta.



**Kuva 8.** Lepsämänjoen ja Härkälänjoen virtaamien mittauspaikat. Paikat eroavat maankäytöltään ja maaperältään toisistaan. Härkälänjoen asema sijaitsee lähempänä luonnonpuistoa ja luonnonsuojelualuetta, ja sekä sen edustamalla valuma-alueella ja yläjuoksun valuma-alueilla on enemmän metsää. Lepsämänjoen alaosan mittausasema ja sen ympäröivät valuma-alueet ovat enemmän maatalousvaltaisia. (SYKE 2014)

#### 4.5 Eroosiomalleista yleisesti

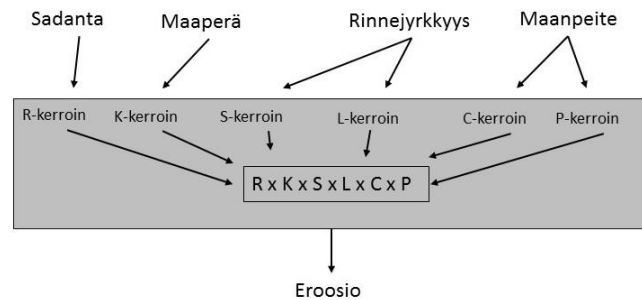
Empiirinen eroosion mittaaminen ja mallintaminen käsin manuaalisesti paikan päällä on vaikeaa, usein aikaa vievää ja kallista. Se perustuu hyvin paikalliseen havainnointiin, mittaamiseen ja kokeiden tekemiseen ja vaatii pitkän aikavälin aineistoja (Setegn et al. 2010). Vaihtoehtona tälle on käyttää erilaisia malleja kuvaamaan ja arvioimaan eroosiota ja sen määrää. Yksinkertaisimmillaan tämä voi tarkoittaa esimerkiksi eroosion kuvaamista sadannan funktiona (ns. *black-box model*, mustalaatikko-malli) (Morgan & Nearing 2011) (kuva 9).



**Kuva 9.** Yksinkertainen tapa kuvata eroosiota tai maaperän katoamista. Sadannan tai valunnan ja eroosion välille löydetään jonkinlainen tilastollinen riippuvuus (muokattu Morgan & Nearing 2011).



Empiiriset mallit perustuvat kerätyn aineiston analysointiin ja vasteiden löytämiseen (Merritt et al. 2003). Puhutaan niin sanotuista harmaalaatikkomalleista (*grey-box model*) (Morgan & Nearing 2011) (kuva 10). Koska lähtöaineisto on jo luonteeltaan paikallista, empiirisen eroosiomallin käyttäminen muissa olosuhteissa tai muilla alueilla voi olla haasteellista (Ndomba et al. 2008). Ne ovat kuitenkin edelleen laajasti käytettyjä yksinkertaisuutensa vuoksi (Shen et al. 2009), erityisesti USLE (*Universal Soil Loss Model*) ja sen variantit esiintyvät monessa tutkimuksessa edelleen.



**Kuva 10.** Harmaalaatikkomallin esimerkkinä USLE-kaava. Kentällä mitatuista arvoista muodostetaan mustalaatikko-mallia monimutkaisempia tilastolliseen riippuvuuteen perustuvia polynomi- tai regressioanalyyssejä, jotka antavat tuloksen esimerkiksi eroosion määrästä. (Muokattu Morgan 2011)

Vaihtoehto on käyttää niin sanottuja fysikaalisia malleja, jotka perustuvat seuraaviin lakeihin, tietoihin ja olettamuksiin (Setegn et al. 2010). Mallinnuksen taustalla on tieto pohjimmaisista eroosioprosesseista, joihin on sisällytetty lait massan ja energian säilymisestä. Näistä käytetään termiä lasilaatikkomalli (*white-box model*) (Morgan & Nearing 2011). Fysikaaliset mallit ottavat huomioon eri tekijöiden spatiaaliset ja temporaaliset muutokset. Edellä mainitut ominaisuudet täyttäviä malleja on suhteellisen paljon, esimerkiksi WEPP, TOPOG, PERFECT, LISEM ja CREAMS (Merritt et al. 2003; Shen et al. 2009), mutta SWAT on saavuttanut viime vuosina kasvavan suosion erityisesti ei-pistemäisen kuormituksen mallintamisessa (Shen et al. 2009, Scopel et al. 2012; White et al. 2012).

Empiiristen ja fysikaalisten mallien lisäksi kolmas tapa lähestyä eroosion mallinnusta on käyttää niin sanottuja konseptuaalisia malleja. Ne jakavat valuma-alueen sarjaksi itsenäisiä alueita, joihin aines varastoituu tai joista se liikkuu pois (Merritt et al. 2003). Konseptuaalisten mallien voidaan sanoa olevan empiiristen ja fysikaalisten mallien välimuoto. Ne toisaalta kuvaavat aineksen virtausta dynaamisesti varastosta toiseen ja

ottavat huomioon eri yksiköiden yksilölliset olosuhteet ja ominaisuudet, mutta eivät vaadi yhtä paljon spatiaalisia aineistoja kuin fysikaaliset mallit (Merritt et al. 2003).

Eroosiomalleissa, olivat ne sitten valuma-aluepohjaisia tai ei, on kuitenkin aina piirteitä ja ominaisuuksia myös muista malleista. Täten jako kolmeen luokkaan on hieman keinotekoinen ja sen tarkoituksena on vain selventää eri mallien paikoin häilyviä eroja.

#### **4.6 Tutkielmassa käytetty fysikaalinen malli**

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) on valuma-aluepohjainen mallinnusohjelma, jonka kehitti Jeff Arnold USDA:n (*United States Department of Agriculture*) Agricultural Research Service:lle (Neitsch et al. 2011). Malli kehitettiin, jotta voitaisiin ennustaa maankäytön vaikutuksia vesistöihin sekä sedimentin ja kemikaalien määriä laajoissa monimuotoisissa valuma-alueissa, joissa on vaihteleva maaperä ja vaihtelevat maankäytön muodot (Arnold et al. 1998; Neitsch et al. 2011). SWAT on kaikista yleisimmin käytetty ja se on saanut laajan suosion erityisesti ei-pistemäisten ongelmien tunnistamisessa ja hallinnassa kansainvälisesti (Shen et al. 2009; Scopel 2012). SWAT-malli on ladattavissa kirjoitushetkellä osoitteesta <http://swat.tamu.edu/>.

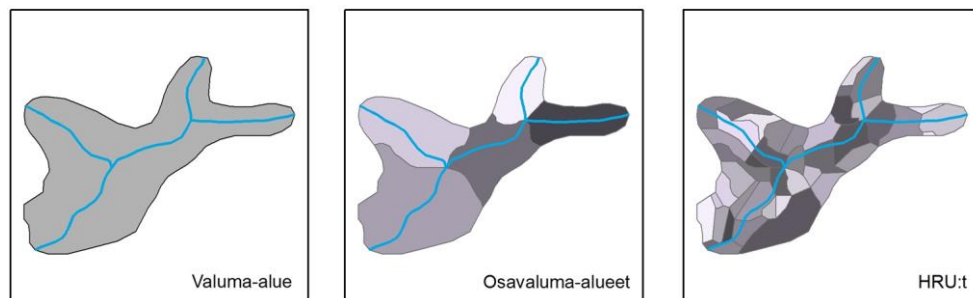
SWAT:in ydinajatus voidaan jakaa neljään perusosaan (Neitsch et al. 2011). Ensinnäkin se perustuu fyysiseen maailmaan tilastollisten riippuvuuksien sijaan. Vaatimuksena on tarkkaa tietoa säästä, kasvillisuudesta, topografiasta, maaperästä ja maankäytön muodoista valuma-alueen sisällä. Lähestymistavan etu on kaksipuoleinen. Toisaalta valuma-alueet, joilta ei ole kerätty aineistoja, voidaan silti mallintaa käyttäen hyödyksi valmiiksi saatavilla olevia paikkatietoaineistoja, ja toisaalta eri aineistojen ominaisuudet ja vaikutukset voidaan kvantifioida (Neitsch et al. 2011).

Toiseksi tarvittavat aineistot ovat helposti saatavilla (Neitsch 2011). Kompleksisien prosessien mallintaminen on mahdollista, mutta onnistuneeseen yksinkertaisen mallin ajoon vaadittavia aineistoja on saatavilla lähes jokaisesta maasta. Edelliseen liittyen etuna on myös mallin laskennallinen tehokkuus, mikä vaikuttaa suoraan alentavasti kustannuksiin (Neitsch 2011). Neljänneksi, malli mahdollistaa pitkän aikavälin muutosten seurannan ja kehittymisen (Neitsch 2011). SWAT:ia onkin luonnehdittu jatkuva-aikamalliksi (*continuous time model*) (Arnold et al. 1998).

Mallinnuksen perustana on aina valuma-alue (tässä tutkielmassa vesistöalue), jonka koko voi vaihdella suuresti. Malli jakaa valuma-alueen pienempiin osavaluma-alueisiin

niin, että jokaisessa osavaluma-alueessa on yksi pääuoma ja mahdollisesti yksi tai useampia sivu-uomia (Arnold et al. 1998). Jaottelun etuna on se, että se mahdollistaa alueellisten erojen paremman näkyvyyden tuloksissa (Arnold et al. 1998; Bärlund 2007; Neitsch 2011). Toisin sanoen valuma-alue ei koskaan ole homogeeninen, vaan maaperän, kasvillisuuden, maankäytön, rinnejyrkkyyden ja jopa mikroilmaston pirstaloima monimuotoinen kokonaisuus.

SWAT tunnistaa ominaisuuksiltaan samankaltaiset alueet ja yhdistää ne mallinnuksen pienimpään yksikköön HRU:n (*Hydrological Response Unit*) (Kuva 11) (Neitsch 2011). Ideana on, että samaan HRU:n kuuluvat alueet reagoivat muuttujiin samalla tavalla. HRU:n koko voi vaihdella teoriassa metreistä useisiin satoihin metreihin tai jopa kilometreihin.



**Kuva 11.** Havainnekuva SWAT:issa olevista alueellisista yksiköistä. Suurin on valuma-alue (tai tässä tutkielmassa Lepsämänjoen vesistöalue). Se jaetaan korkeusmallin ja uomien perusteella osavaluma-alueisiin ja edelleen maaperän ja maankäytön/peitteen perusteella HRU:hin. HRU:t ovat mallinnuksen pienin alueellinen yksikkö, mutta niiden koko on tarkimmillaan niin pieni, että tutkielmassa pysyttiin osavaluma-aluetasoon tarkastelussa. (Neitsch et al. 2011)

#### 4.6.1 Hydrologinen kiertö

Huolimatta siitä minkälaista tutkimuskysymystä SWAT:lla mallinnetaan, kaiken perustana on veden kiertokulku valuma-alueella (Neitsch et al. 2011). Hydrologisella kierrolla tarkoitetaan auringon lämpöenergian ylläpitämää veden globaalia kiertokulkua biosfäärissä sadannan, haihtumisen ja virtauksen muodossa (Chahine 1992). SWAT:ssa se on jaettu kahteen erilliseen osaan, maavaiheeseen ja vesivaiheeseen (Neitsch et al. 2011).

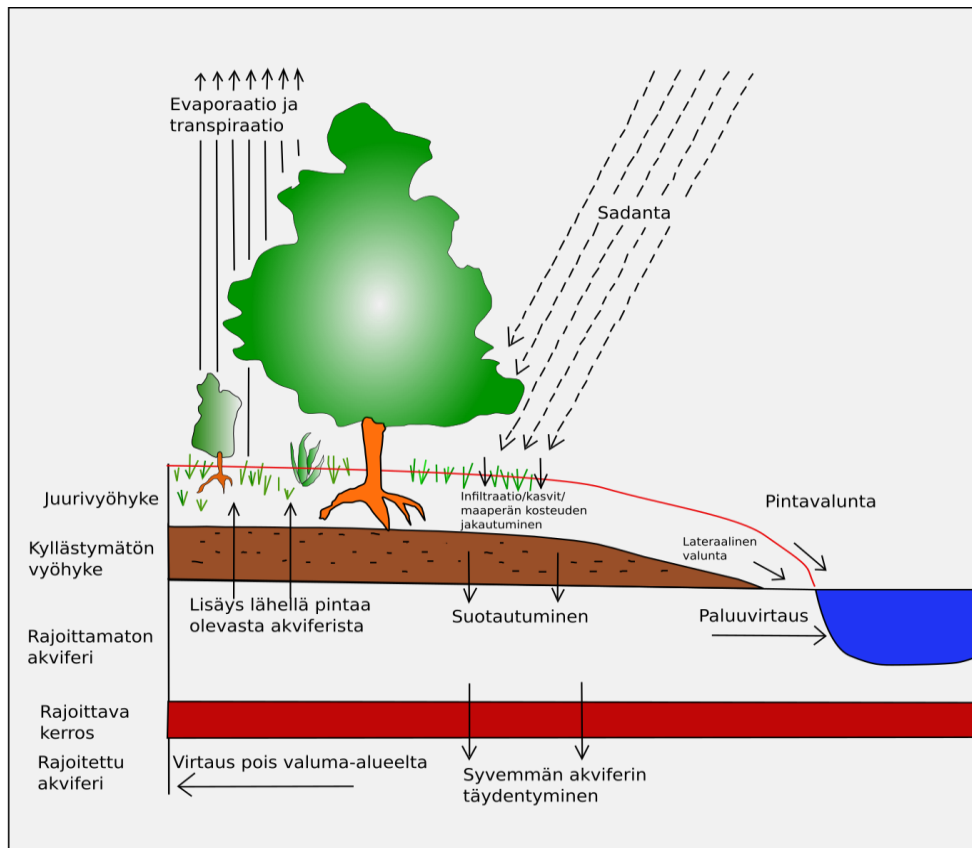
Maavaihe (kuva 12) kontrolloi veden, sedimenttien, ravinteiden ja haitta-aineiden kulkua pääuomaan jokaisessa erillisessä osavaluma-alueessa (Neitsch et al. 2011). Se perustuu vesibalanssin kaavaan

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{pv} - Q_{pintavalunta} - E_{et} - w_{suotautuminen} - Q_{paluuvirtaus})$$

jossa:

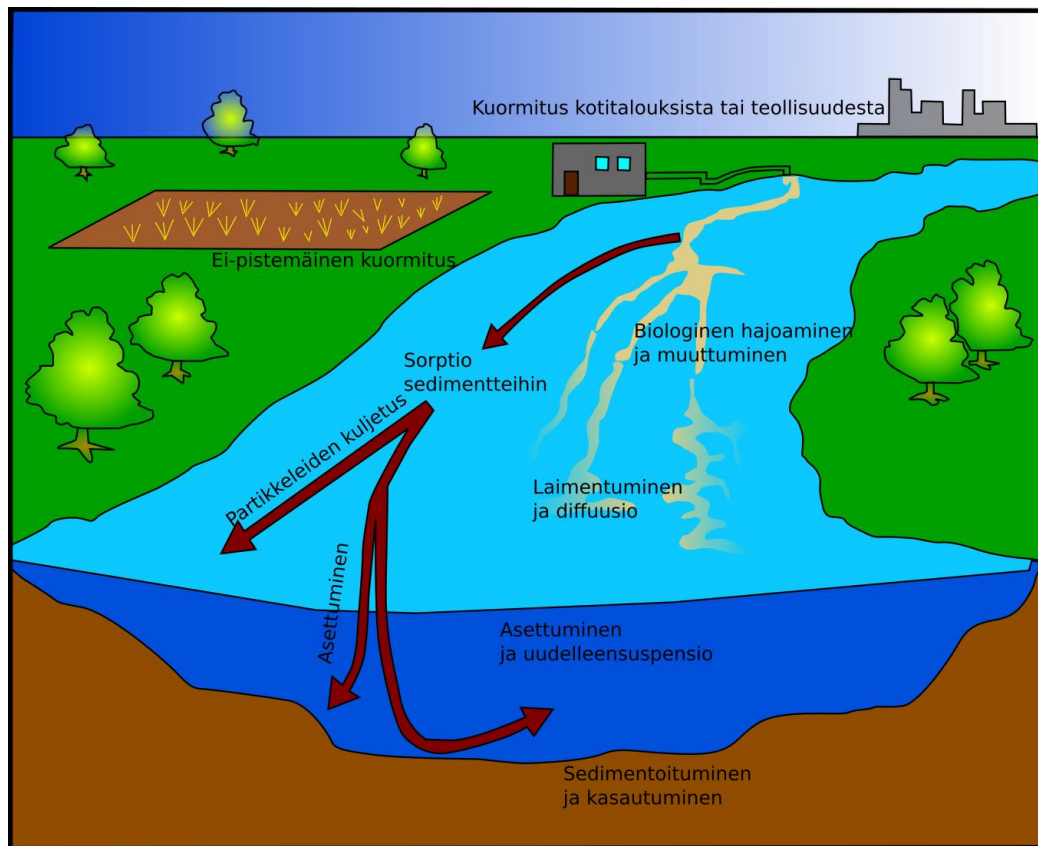
- $SW_t$  = lopullinen maaperän vesi (mm/pv)
- $SW_0$  = alkuperäinen maaveden määrä päivänä i (mm/pv)
- t = aika (päivinä)
- $R_{pv}$  = sademäärä päivänä i (mm/pv)
- $Q_{pintavalunta}$  = pintavalunnan määrä päivänä i (mm/pv)
- $E_{et}$  = evapotranspiraation määrä päivänä i (mm/pv)
- w = suotautuminen = se määrä vettä, joka etenee veden kyllästämään vyöhykkeeseen päivänä i (mm/pv)
- $Q_{paluuvirtaus}$  = paluuvirtauksen määrä päivänä i (mm/pv)

Sen takia, että osavaluma-alueiden sisälle on tässä vaiheessa jo määritelty HRU:t, pystyy malli ennustamaan esimerkiksi kokonaishaihdunnan ja valunnan hyvällä spatiaalisella tarkkuudella. Kuvaa 12 voisi siis luonnehtia yhdeksi määritellyksi HRU:ksi, jossa vesibalanssi toimii omalla yksilöllisellä tavallaan riippuen HRU:n ominaisuuksista ja olosuhteista. Viereisessä HRU:ssa esimerkiksi maaperän ominaisuudet tai kasvillisuuden määrä voisi olla täysin toinen, minkä seurauksena myös osavaluma-alueen pääuomaan päätyvän veden määrä on eri.



**Kuva 12.** Hydrologisen kierron maavaihe. Satavalla vedellä on monta mahdollista kulkeutumisvaihtoehtoa. HRU:iden ansiosta valuma-alueiden erot tulevat näkyviin jo tässä vaiheessa mallinnusta. Vain osa satavasta vedestä ja sen kuljettamasta sedimentistä päätyy osavaluma-alueen pääuomaan. Kuvaa voisi siis luonnehtia yhdeksi määrittelyksi HRU:ksi, jossa vesibalanssi toimii omalla yksilöllisellä tavallaan riippuen HRU:n ominaisuuksista ja olosuhteista. Viereisessä HRU:ssa esimerkiksi maaperän ominaisuudet tai kasvillisuuden määrä voisi olla täysin toinen, minkä seurauksena myös osavaluma-alueen pääuomaan päätyvän veden määrä on eri. (Muokattu Neitsch et al. 2011)

Vesivaihe (kuva 13) kuvaa aineksen liikettä uomastossa kohti koko valuma-alueen purkupistettä (Tattari s.a.) sekä sen mahdollista muuttumista eri muotoihin (Neitsch et al. 2011). Vesivaiheen aikana mallinnettaville komponenteille (vesi, sedimentti, ravinteet, orgaaniset aineet) voi tapahtua monia asioita (Neitsch et al. 2011). Uomastossa oleva vesi ei pysy vakiona, vaan sitä voi tulla lisää sadannan kautta tai sitä voi vähentyä esimerkiksi haihdunnan vuoksi. Sedimentti voi asettua paikalleen tai sitä voi irrota lisää uoman pohjasta. Ravinteet ja kemikaalit voivat muuttua toisiksi, tai niitä voi jäädä loukkuun aineksen asettuessa uoman pohjalle.



**Kuva 13.** Hydrologisen kierron vesivaihe ja prosessit sen aikana. Aines voi olla peräisin monesta eri lähteestä valuma-alueella. Vesivaiheessa aines kulkeutuu uomaston kautta kohti alajuoksua ja voi käydä kulkeutumisen aikana läpi monta eri prosessia (muokattu Neitsch et al. 2011).

#### 4.6.2 Eroosion mallinnuksen teoria

Edellä on selostettu yleisellä tasolla, miten SWAT mallintaa erilaisia ilmiöitä valuma-alueen sisällä ja minkälaisia prosesseja aineksen kulkeutumisen eri vaiheissa on. Eroosion mallinnus tapahtuu samoin periaattein. Sateesta ja valunnasta aiheutuvaa eroosiota mallinnetaan MUSLE-kaavalla (*Modified Universal Soil Loss Equation*). MUSLE perustuu 1960- ja 1970-luvuilla kehitettyyn USLE:n (Neitsch et al. 2011).

Oleellisena erona näissä kahdessa eroosion laskentatavassa on se, että USLE arvioi vuosittaista eroosion määrää sademäärän energian erosionaalisena funktiona (Wischmeier & Smith 1978) eikä ota huomioon yksittäisiä myrsky tapahtumia. MUSLE sen sijaan arvioi eroosiota sademäärän sijaan valuman funktiona. Tämä tarkoittaa sedimentin saannon tuloksia, poistaa tarpeen käyttää SDR-parametria (*Sediment Delivery Ratio*, yksinkertaistettusti se määrä kokonaiseroosiosta joka poistuu tietyltä

alueelta) ja mahdollistaa yksittäisten myrskytahtumien mallinnuksen (Lu et al. 2004; Shen et al. 2009; Zhang 2009).

MUSLE koostuu seuraavista osista:

$$sed = 11,8 \cdot (Q_{pinta} \cdot q_{max} \cdot A_{hru})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG$$

missä

- sed = sedimentin saanto päivässä (tonneina)
- $Q_{pinta}$  = pintavalunta (mm/ha)
- $q_{max}$  = valunnan maksimi ( $m^3/s$ )
- $A_{hru}$  = HRU:n pinta-ala ( $ha/km^2$ )
- $K_{USLE}$  = maaperän eroosion potentiaalinen määrä
- $C_{USLE}$  = maankäytön ja -peitteen muuttuja
- $P_{USLE}$  = eroosion ehkäisytoimet
- $LS_{USLE}$  = topografia
- CFRG = karkeat fragmentit

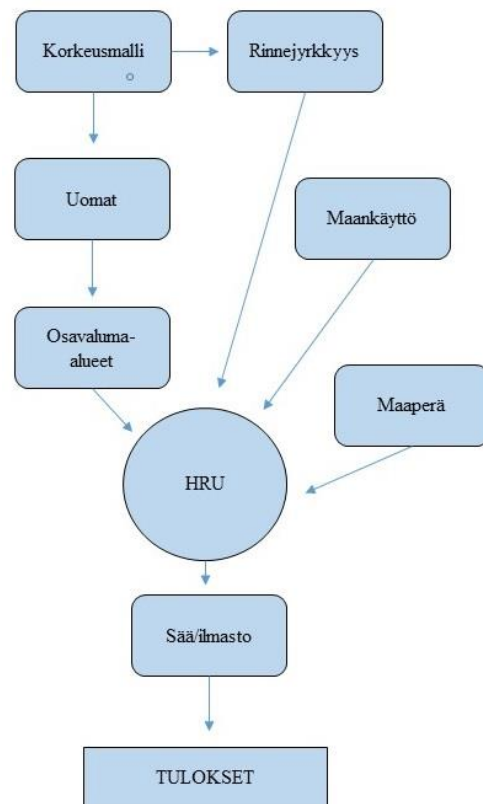
Sedimentin määrä on riippuvainen sadannasta, valuman määrästä, maksimivalunnasta, HRU:n ominaisuuksista ja edellä kuvatusta kaksijakoisesta vesibalanssiprosessista. Valuma-alueelta pois kulkeutuvan aineksen määrä on riippuvainen uoman virtausnopeudesta (Shen et al. 2009). Oleellista on ymmärtää, että SWAT ei mittaa tai mallinna alueella tapahtuvaa maa-aineksen vähenemistä, vaan HRU:ista ja valuma-alueelta uomiin päätynyttä ja uomien kautta poistuneen aineksen määrää.

#### 4.7 Mallin valmistelu

Tarvittavat aineistot ja polku aineistoista HRU:iden kautta tuloksiin on esitetty yksinkertaistetusti kuvassa 14. Digitaalinen korkeusmalli on kaiken perusta, joka määrää paitsi topografian ja rinnejyrkkyyden, myös osavaluma-alueiden muodon ja uomat niiden sisällä. Jos käyttäjällä on valmista aineistoa tutkimusalueen uomista tai on jo tehnyt oman valuma-aluejaon, tämä aineisto voidaan syöttää malliin myös erikseen. Muuten SWAT tekee osavaluma-aluejaon automaattisesti, tosin käyttäjä voi

säätää esimerkiksi osavaluma-alueiden minimi- tai maksimikokoja ja muokata uomia muiden lähteiden perusteella.

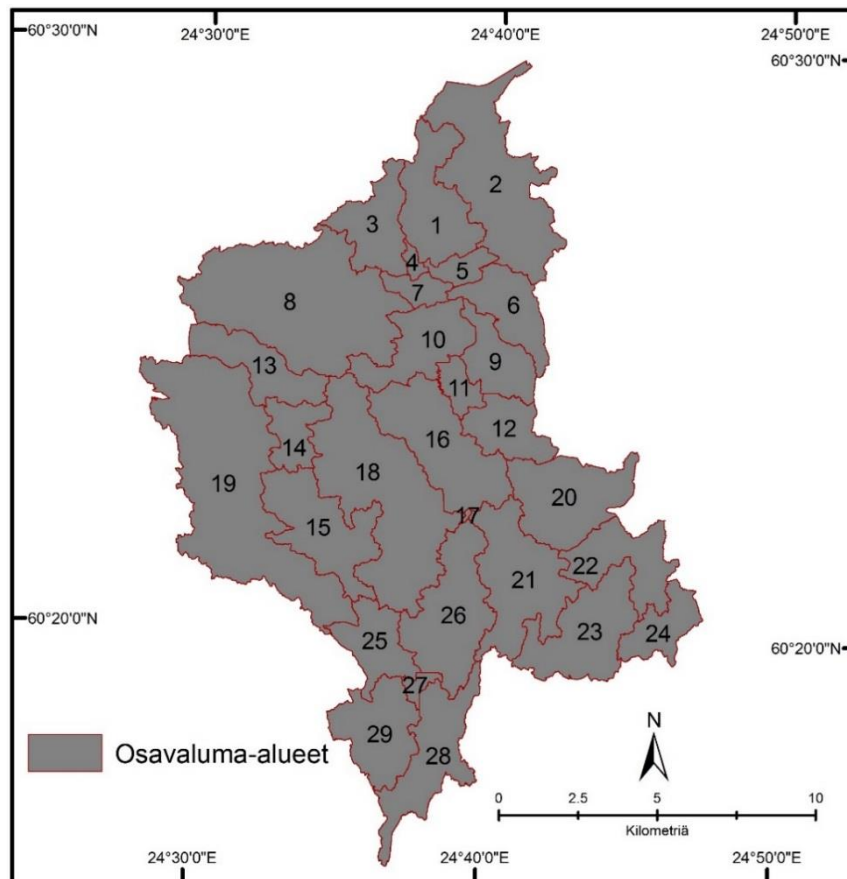
**Kuva 14.** Yksinkertaistettu kaavio eroosiomallinukseen vaadittavista aineistoista. Perustana on korkeusmalli, josta saadaan rinnekaltevuus, uomat ja osavaluma-alueet. Lisäksi tarvitaan tietoa alueen maaperästä ja maankäytöstä. Aineistot yhdistämällä saadaan yksilöllinen HRU jokaiselle koordinaatille osavaluma-alueilla. Tämän jälkeen HRU altistuu sälle (eli sateelle ja valumalle), mistä saadaan eroosiotulokset tonneina. (Neitsch et al. 2011)



Kun korkeusmallista saadut tiedot liitetään alueen maankäyttöön ja maaperään, saadaan osavaluma-alueiden jokaiselle koordinaatille yksilöllinen HRU. Tämän jälkeen ilmastoaineisto tuo prosessiin mukaan edellä kuvatun kaksijakoisen vesibalanssin ja veden kierron, mikä irrottaa, kasaa ja kuljettaa ainesta jokaisesta HRU:sta ja osavaluma-alueesta MUSLE-kaavan mukaisesti uomiin, purkautumispisteeseen ja lopulta ulos koko suurvaluma-alueelta. Tutkielmassa pysyttiin valuma-alueen tarkastelussa, sillä HRU:ta tutkimusalueelle tuli monta sataa, eikä niiden vertailu olisi ollut mielekäästä.

Uomien piirtämisen ja laskujokien määrittämisen jälkeen valuma-alueelle muodostui yhteensä 29 erillistä osavaluma-aluetta (kuva 15) ja yksi piste, minkä kautta kaikki valuma-alueelle satava ja joissa virtaava vesi laskee pois kohti Vantaanjoen vesistöaluetta. Lisäksi valuma-alueen lopullinen koko pieneni hieman alkuperäisestä.





**Kuva 15.** Tutkimusalueen lopullinen valuma-aluejako. Kaikkiaan valuma-alueita muodostui mallia rakentaessa 29 kappaletta. Kuten kuvata näkyy, niiden koko ja muoto vaihtelevat melko paljon ja se on riippuvainen digitaalisen korkeusmallin perusteella arvioidusta topografiasta.

#### 4.7.1 Maankäytön uudelleenluokitus

Maankäytön alkuperäiset 11 luokkaa luokiteltiin uudelleen SWAT-mallin tarjoamien luokitusperusteiden mukaan (taulukko 5). Suuria muutoksia luokitukseen ei tullut, joskin GTK:n melko tarkkakin jaottelu jouduttiin hieman yksinkertaistamaan. Maankäytön muodot ja niiden suhteelliset osuudet pysyivät samoina läpi mallinnuksen.

**Taulukko 5.** Maankäytön/peitteen uudelleenluokitus. GTK:n luokkia vastaavat maanpeitteet löytyivät suhteellisen vastaavasti SWAT-mallin dokumentaatiosta. Jonkinasteista yleistämistä jouduttiin kuitenkin tekemään GTK:n varsin tarkkaan luokitteluun.

| GTK-luokitus                       | SWAT-luokitus | Selite                       |
|------------------------------------|---------------|------------------------------|
| Väljästi rakennetut asuinalueet    | URLD          | Urbaani alue, harvaan asuttu |
| Teollisuuden ja palveluiden alueet | UIDU          | Urbaani alue, teollisuutta   |
| Maa-ainesten ottoalueet            | UCOM          | Yritysten alueet             |
| Taajamien viheralueet ja puistot   | URBN          | Urbaani alue                 |
| Urheilu ja vapaa-aika              | URBN          | Urbaani alue                 |
| Pellot                             | AGRC          | Maanviljelys, tiivis         |
| Pienipiirteinen maatalousmosaiikki | AGRL          | Yleinen maatalousalue        |
| Lehtimetsät                        | FRSD          | Lehtimetsät                  |
| Havumetsät                         | FRSE          | Ikivihreät metsät            |
| Sekametsät                         | FRST          | Sekametsät                   |
| Harvapuustoiset alueet             | RNGE          | Ruohoja                      |
| Järvet (vesi)                      | WATR          | Vesi                         |

#### 4.7.2 Maalajien ominaisuudet

Koska SWAT-mallille ei ole Suomen olosuhteisiin valmiiksi rakennettuja maaperätietokantoja, jouduttiin maalajeille antamaan mallin vaatimia ominaisuustietoja manuaalisesti (taulukko 6). Arvot perustuvat joko parhaaseen arvioon tai saatavilla olevista lähteistä otettuihin arvioihin. Tiedot linkittyvät jokaiselle tutkimusalueen sisällä olevalle maalajikoordinaatille. Ominaisuuksien selitykset (Neitsch et al. 2011):

- Hydrologinen ryhmä: Yleisellä tasolla maalajin vedenjohtavuus (vain yleistä tulkintaa varten, ei vaikuta tuloksiin)
- SOL\_ZMX: juurien syvin mahdollinen ulottumissyvyys (mm). Oletusarvona juuret voivat ulottua koko maannosprofiilin läpi
- SOL\_Z: kerroksen syvyys (mm)

- SOL\_AWC: kasveille käytettävissä olevan veden määrä (mm vettä/mm maaperää)
- SOL\_K: vedenjohtavuus (mm/tunnissa)
- SOL\_CBN: orgaanisen aineksen määrä (% painosta)
- Savi: saven osuus (% painosta)
- Siltti: siltin osuus (% painosta)
- Hiekka: hiekan osuus (% painosta)
- Kiviaineksen osuus (% painosta)
- USLE\_K: USLE-kaavan mukainen eroosiokerroin

**Taulukko 6.** Maalajeille annetut ominaisuustiedot (University of Saskatchewan s.a., Nyholm et al. 2003, OMFRA 2012). Ne kuvaavat maaperän fyysisiä ominaisuuksia erityisesti veden kulkeutumisen ja infiltraation sekä erodoitumisalttiuden kannalta. Osa ominaisuustiedoista jätettiin joko oletusarvoihinsa tai niihin sovellettiin mahdollisimman paljon tutkimusalueen olosuhteita vastaavia muista tutkimuksista saatuja arvoja.

|                    | Kallioma | Hiekkamoreeni | Vesi | Saraturve | Rahkaturve | Liejusavi | Savi | Lieju | Täytemaa | Hiesu | Hieno hietä | Karkea hietä | Hiekka |
|--------------------|----------|---------------|------|-----------|------------|-----------|------|-------|----------|-------|-------------|--------------|--------|
| Hydrologinen ryhmä | D        | B             | D    | B         | B          | D         | D    | C     | C        | C     | B           | A            | A      |
| SOL_ZMX            | 1        | 500           | 0.5  | 200       | 200        | 100       | 200  | 100   | 950      | 600   | 700         | 700          | 1000   |
| SOL_Z              | 1000     | 500           | 1,72 | 1000      | 1000       | 1000      | 200  | 1000  | 1000     | 1000  | 1000        | 1000         | 1000   |
| SOL_AWC            | 0,01     | 0.15          | 0    | 0.9       | 0.9        | 0.8       | 0.15 | 0,9   | 0.4      | 0,2   | 0,2         | 0,3          | 0,15   |
| SOL_K              | 1        | 50            | 260  | 150       | 150        | 30        | 650  | 36    | 36       | 36    | 200         | 300          | 360    |
| SOL_CBN            | 0        | 8             | 0    | 70        | 70         | 30        | 4    | 13    | 13       | 2     | 2           | 2            | 2      |
| Savi               | 0        | 3             | 0    | 5         | 5          | 50        | 56   | 33    | 33       | 20    | 10          | 10           | 5      |
| Siltti             | 0        | 34            | 0    | 5         | 5          | 20        | 34   | 0     | 33       | 0     | 10          | 10           | 5      |
| Hiekka             | 0        | 63            | 0    | 5         | 5          | 30        | 34   | 60    | 34       | 0     | 50          | 5            | 90     |
| Kiviaineksen osuus | 0        | 31            | 0    | 0         | 0          | 0         | 10   | 0     | 15       | 0     | 0           | 0            | 0      |
| USLE_K             | 0        | 0.14          | 0    | 0.1       | 0.1        | 0.09      | 0,22 | 0,04  | 0,1      | 0,3   | 0,4         | 0,3          | 0,02   |

#### 4.8 Kalibrointi ja validointi

Ennen mallin kalibrointia ja validointia SWAT:ista tunnistettiin tuloksiin herkimmin vaikuttavat parametrit Tätä kutsutaan nimellä herkkyysanalyysi, jossa seurataan muutoksia tuloksissa kun syöttöaineistoja muokataan (Arnold et al. 2012). Samalla saadaan hyvä yleiskuva eri muuttujien merkittävyydestä. Herkkyysanalyysi voidaan tehdä joko muuttamalla yksi parametri kerrallaan, tai muuttamalla kerralla kaikki parametrit (Arnold et al. 2012). Erityisesti Suomessa ja Pohjoismaissa tehtyjen SWAT:ia hyödyntäneiden tutkimusten (Bouraoui et al. 2004; Bärlund et al. 2007; Tattari et al. 2009) perusteella säädettäviksi parametreiksi valikoitui kaikkiaan 16 parametria (taulukko 7).

Kalibroinnin tavoitteena on parantaa mallin ennustamiskykyä vertaamalla simuloituja tuloksia paikallisiin tuloksiin, eli sellaisiin tuloksiin jotka on mitattu tutkittavalta alueelta (Arnold et al. 2012). Mallin ennusteen ja mitattujen tulosten perusteella parametreille valitaan sopivat arvot. Viimeinen askel ennen varsinaista mallinnusta on validointi. Ennustetta verrataan tuloksiin ja mittauksiin joita ei käytetty kalibrointivaiheessa käyttäen kalibroinnissa annettuja parametriarvoja (Arnold et al. 2012). Kalibrointiin, validointiin ja muihin ongelmien etsimiseen on kehitetty SWAT-Cup-ohjelma, joka sisältää useita kalibraatio- ja validaatiomenetelmiä.

SUFI-2 valikoitui tutkielmassa käytettäväksi menetelmäksi. Perustana on ilmoittaa kalibroitujen parametrien epävarmuus, ns. 95PPU-vaihteluväli (*95% prediction uncertainty*). Mikään malli ei koskaan ole täydellisesti kalibroitu, joten virheellisesti ”absoluuttisesti parhaiden” parametriarvojen sijaan SUFI-2 ilmoittaa arvoille vaihteluvälin, parhaimman simulaation parhaimmat arvot ja uudet välit parametreille.

Simuloitujen ja mitattujen arvojen sekä mallin yleistä ennustamiskykyä kuvaamaan on kehitetty erilaisia tilastollisia tunnuslukuja. Kirjallisuuden perusteella ja SWAT-Cup-ohjelman mahdollisuuksien mukaan näiksi luvuiksi valikoituivat R, P, R<sup>2</sup> ja NS. R ja P ovat SUFI-2:n omia sisäisiä mittareita. R kuvaa sitä epävarmuutta tai määrää, millä sen hetkiset parametriarvojen välit pystyvät selittämään havaittuja tuloksia. Toisin sanoen, mitä suurempi R-arvo, sitä suurempi on epävarmuus simuloitujen ja mitattujen havaintojen välillä. P ilmaisee sitä prosenttimäärää, jonka simuloidut havainnot kattavat mitatuista.

Nash-Sutcliffe (NS) on mallin tehokkuuden mittari (Nash & Sutcliffe 1970). Se voidaan ilmaista kaavalla

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2}$$

missä

- Q = muuttuja (virtaama)
- m = mitattu
- s = simuloitu
- yläviiva = keskiarvo

NS voi vaihdella äärettömästä negatiivisesta arvosta arvoon yksi, yhden kuvaten täydellistä simulaatiota. Tällöin simuloidut ja mitatut arvot olisivat samat.

Selitysaste R<sup>2</sup> ilmaistaan kaavalla

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2}$$

missä

- Q = muuttuja (virtaama)
- m = mitattu
- s = simuloitu
- i = i<sup>th</sup> mitattu tai simuloitu data

Mitä lähempänä arvoa yksi R<sup>2</sup> on, sitä paremmin malli toimii ja simuloi mitattuja arvoja.

Tarkkoja määritelmiä sille, minkä raja-arvon ylitse luvut täytyisi saada, ei ole. SWAT-Cup:in kehittäjät (Abbaspour 2015) suosittelevat SUFI-2- menetelmää käytettäessä yli 70% arvoa P:lle ja noin 1:tä R:lle. Selitysasteen ja NS:n osalta lukujen tulisi olla yli 0,5 (Quinton 1997; Abbaspour 2015), jotta malli toimisi hyvin. Arvot yli 0,7:n ovat Quintonin (1997) mukaan harvinaisia. Abbaspour et al. (2015) luonnehtivat R<sup>2</sup>:n osalta

yli 0,3 arvoja ”suhteellisen hyväksi”. Valuma-alueet ovat kompleksisia kokonaisuuksia, eikä korkeimman mahdollisen tilastollisen arvon loputon tavoittelemisen enää edusta edes yksinkertaistusta oikeasta maailmasta (Abbaspour 2015). Mitä pienemmäksi parametrien alimman ja ylimmän arvon väli tulee, sitä pienemmäksi muuttuvat myös P ja R (Abbaspour 2015).

Koska veden liike on SWAT-mallissa kaiken perusta (Neitsch et al. 2011), eroosiota voidaan olettaa olevan mahdollista mitata, kun malli on kalibroitu ja validoitu virtaaman perusteella. Jos tarkoituksena olisi mitata absoluuttisesti eroosion määrää tarkimmalla mahdollisella tavalla, malli tulisi kalibroida ja validoida myös sedimentin määrään liittyvällä parametrilla. Tutkielman tavoitteena on kuitenkin yleisellä tasolla arvioida sitä, miten eroosio käyttäytyy ilmastonmuutoksen vaikutuksesta ja miten SWAT-malli toimii yksinkertaisin paikkatietoaineistoin.

Kalibraatiota varten valittiin yhteensä 16 hydrologiaa ja virtaamaa säätelevää parametria (taulukko 7). Kalibrointi aloitettiin asettamalla parametrien vaihteluväliksi joko mallin absoluuttiset minimi- ja maksimi-arvot tai valitsemalla kirjallisuuden perusteella yleisiä hyviä välejä. Tämän jälkeen virtaamaa simuloitiin 100 kertaa, ja näistä valittiin parhaat parametriarvot uuteen iteraatioon. Yhteensä iteraatioita suoritettiin seitsemän kappaletta ja simulaatioita 100 kappaletta.

**Taulukko 7.** Mallin kalibrointiin käytetyt parametrit, kalibroidun mallin käytetyt parhaat arvot ja niiden absoluuttiset raja-arvo SWAT:ssa. Kalibrointi tapahtui 16 parametrin perusteella niin että, mallin hyväksymiä absoluuttisia raja-arvoja alettiin jokaisessa iteraatiossa tarkentamaan. Raja-arvot ovat paikoin melko epärealistisia, ja tämä otettiin huomioon.

| Parametri            | Paras arvo | Raja-arvot | Vaikutus   |
|----------------------|------------|------------|--|
| SFTMP                | -4,32      | -20-20     | Satavan lumen lämpötila (°C)   |
| SMTMP                | 4,525      | -20-20     | Lumen sulamisen peruslämpötila, ts. lumi ei ala sulamaan ennen tämän raja-arvon ylitystä |
| SMFMX                | 9,65       | 0-20       | Lumen sulamista säätelevä  |
| SMFN                 | 6,65       | 0-20       | Lumen sulamista säätelevä  |
| TIMP                 | 0,20       | 0-1        | Kuinka paljon lumen edellisen päivän lämpötila vaikuttaa sen sulamiseen                  |
| SNOCVMX              | 24,51      | 0-500      | Lumen vesiarvo   |
| SURLAG               | 8,32       | 0,05-24    | Pintavalunnan viive  |
| GW_DELAY             | 328,97     | 0-500      | Pohjaveden viive (päivinä)   |
| SOL_AWC              | 0,89*      | 0-1        | Kasvien hyödynnettävissä oleva vesi maaperän kerroksessa (mm H2O/mm)                     |
| GWQMN                | 933,47     | 0-5000     | Virtaako vettä pintaa lähellä olevasta pohjavedestä uomaan (mm/t)                        |
| RECHRG_DP            | 0,22       | 0-1        | Kuinka suuri osa vedestä saavuttaa pohjaveden  |
| CANMX                | 67,76      | 0-100      | Latvustopeitteen veden varastointikyky   |
| CN2                  | -0,04*     | 35-98      | Numeerinen kuvaaja maaperän kosteudesta, pinnasta, vedenjohtavuudesta ja maankäytöstä    |
| ESCO                 | 0,51       | 0-1        | Evaporaatio  |
| EPCO                 | 0,10       | 0-1        | Kasvien vedenottokyky  |
| ALPHA_BF             | 0,17       | 0-1        | Alivirtaama  |
| *suhteellinen muutos |            |            |  |

## 5. Tulokset

### 5.1 Sademäärät ja hydrologia

Simuloiduilla lämpötila- ja sademääräaineistoilla vuoden kokonaissadannaksi nykyisessä ilmastossa saatiin 641,24 millimetriä (taulukko 8). Lumisateet sijoittuvat pääosin oikeille kuukausille. Pintavalunta ja kokonaishaihdunta ovat myös ajallisesti oikein. Evapotranspiraation määrä on talvikuukausina murto-osa kevään ja kesän arvoista. Lunta sataa mallin mukaan vielä huhti- ja toukokuussa joitain millimetrejä, mutta määrät eivät ole suuria tai tuloksiin luultavasti suuresti vaikuttavia.

**Taulukko 8.** Keskimääräiset kuukausittaiset hydrologiset tunnusluvut sekä eroosion määrä ennen kalibraatiota koko tutkimusalueella.

| Kk | Sademäärä (mm) | Lumisade (mm) | Pintavalunta (mm) | Kokonaishaihdunta (mm) | Eroosio t/ha |
|----|----------------|---------------|-------------------|------------------------|--------------|
| 1  | 48,71          | 42,35         | 28,51             | 1,95                   | 0,49         |
| 2  | 36,9           | 30,69         | 28,43             | 1,54                   | 0,58         |
| 3  | 38,58          | 34,28         | 9,17              | 4,18                   | 0,14         |
| 4  | 35,53          | 17,63         | 19,96             | 22,01                  | 0,3          |
| 5  | 33,41          | 2,43          | 0,55              | 43,22                  | 0,01         |
| 6  | 55,61          | 0             | 1,05              | 53,6                   | 0,03         |
| 7  | 75,46          | 0             | 2,16              | 67,3                   | 0,05         |
| 8  | 78,77          | 0             | 3,96              | 60,28                  | 0,08         |
| 9  | 62,78          | 0             | 3,06              | 27,68                  | 0,04         |
| 10 | 66,52          | 8,33          | 4,35              | 12,21                  | 0,08         |
| 11 | 64,66          | 43,87         | 9,6               | 3,91                   | 0,17         |
| 12 | 55,52          | 43,74         | 13,59             | 3,7                    | 0,26         |

Taulukkoa 8 voidaan luonnehtia lähtöasetelmaksi, josta lähdettiin rakentamaan ja tarkentamaan kalibraation ja validaation kautta tuloksia ilmastomuutosskenaariota varten.

### 5.2 Virtaama ja eroosio ennen kalibraatiota

Ennen kalibrointia malli ajettiin läpi sen oletusparametreilla vuosilta 2007-2013. Ainoa tehty muutos oli sademäärien korjaaminen. Tulokset virtaaman osalta suhteessa mitattuihin arvoihin on esitetty kuvissa 16 ja 17. Selitysaste (taulukko 9) virtaamalle on Härkälänjoen mittauspisteen osalta 0,12 ja Lepsämänjoen alaosan osalta 0,18. Vastaavat NS arvot ovat -0,02 ja 0,12. Simuloidun ja mitatun virtaaman keskiarvo oli Härkälänjoen



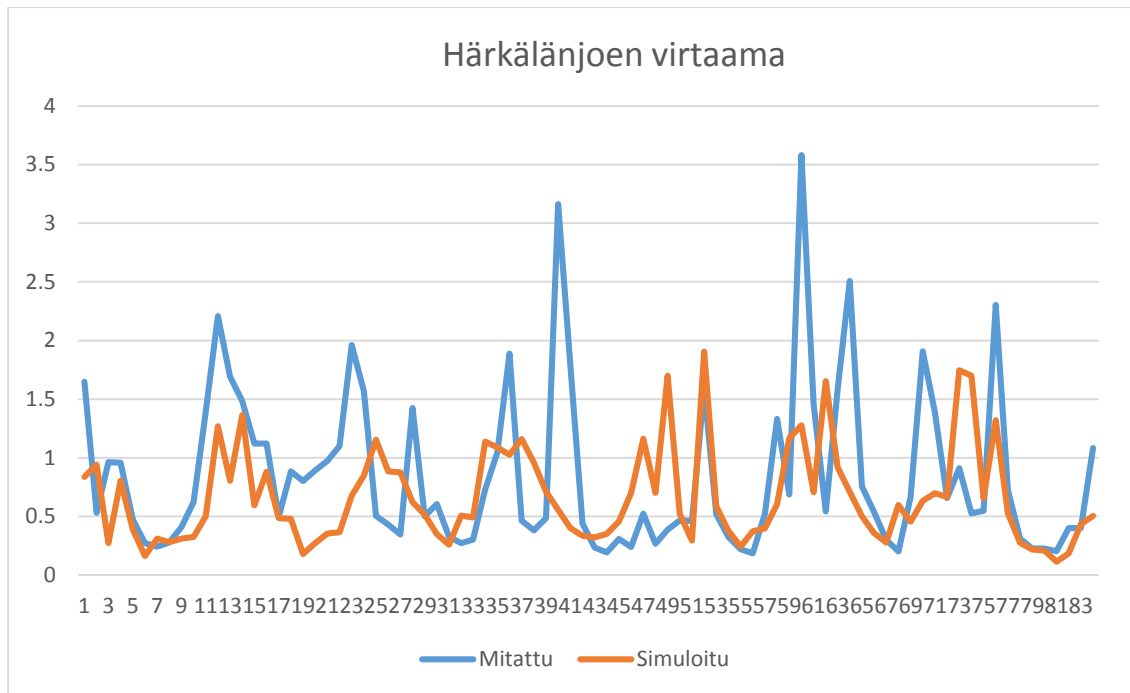
osalta 0,67 ja 0,85 m<sup>3</sup>/s ja Lepsämänjoen alaosan osalta 2,25 ja 2,29 m<sup>3</sup>/s. P- ja R- arvoja ei tässä vaiheessa vielä tarkastella, sillä yhtäkään iteraatiota ei ole vielä tehty.

**Taulukko 9.** Virtaaman tunnusluvut molempien mittauspisteiden osalta ennen kalibraatiota. Ilman kalibraatiota mallin selityskyky on vielä heikko. Iteraatioiden vielä puuttuessa esitettäviä P- ja R-arvoja ei vielä ollut. Lepsämänjoen alaosan arvot ovat Härkälänjokea paremmat.

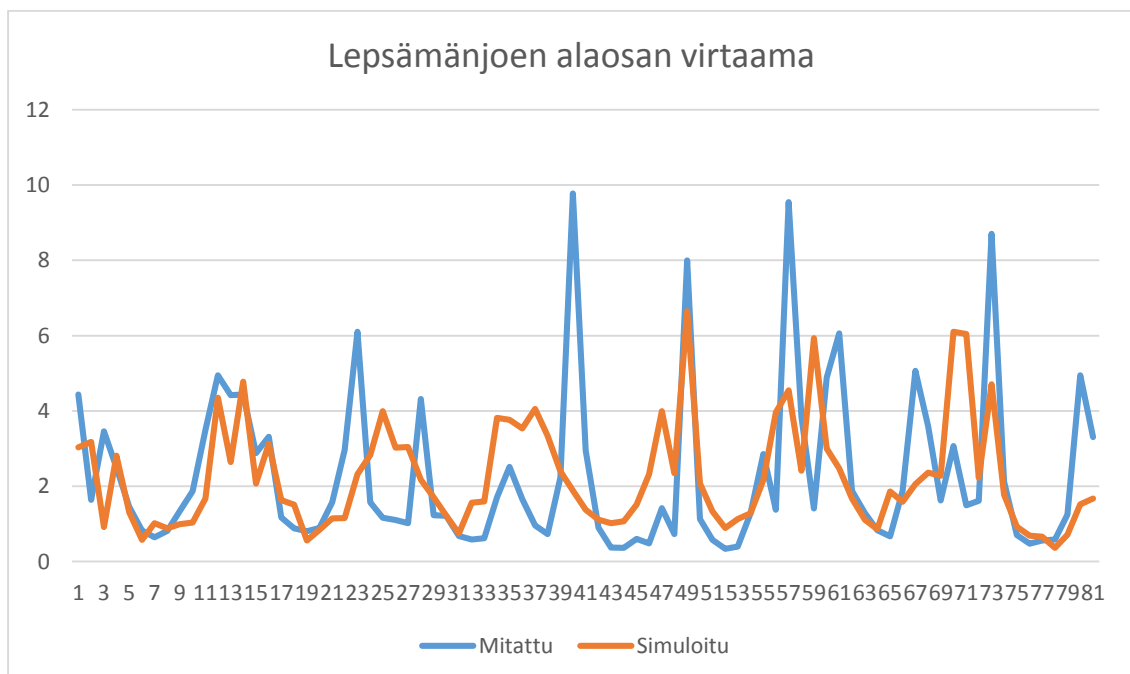
| Asema                  | P | R | R <sup>2</sup> | NS    | Mitattu ka<br>(m <sup>3</sup> /s) | Simuloitu<br>ka (m <sup>3</sup> /s) |
|------------------------|---|---|----------------|-------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Härkälänjoki           | - | - | 0,12           | -0,02 | 0,85                              | 0,67                                |
| Lepsämänjoen<br>alaosa | - | - | 0,18           | 0,12  | 2,29                              | 2,25                                |

Tuloksista näkyy kalibroimattoman mallin olevan mittasuhteiltaan melko hyvin mitattuja arvoja vastaava, mutta sen kyky ennustaa virtaamapiikkien suuruutta ja määrää vielä melko heikko. Härkälänjoen virtaama on huomattavasti Lepsämänjokea matalampi. Härkälänjoella suurin mitattu arvo on noin 3,6 m<sup>3</sup>/s, kun se Lepsämänjoella alajuoksulla on jopa 10 m<sup>3</sup>/s. Eri kuukausien ja vuodenaikojen vaihtelu näkyy kuitenkin kohtalaisesti tässä vaiheessa. Erityisesti matalan virtaaman jaksot ovat hyvin edustettuina ja ovat linjassa mitattujen virtaama-arvojen kanssa.

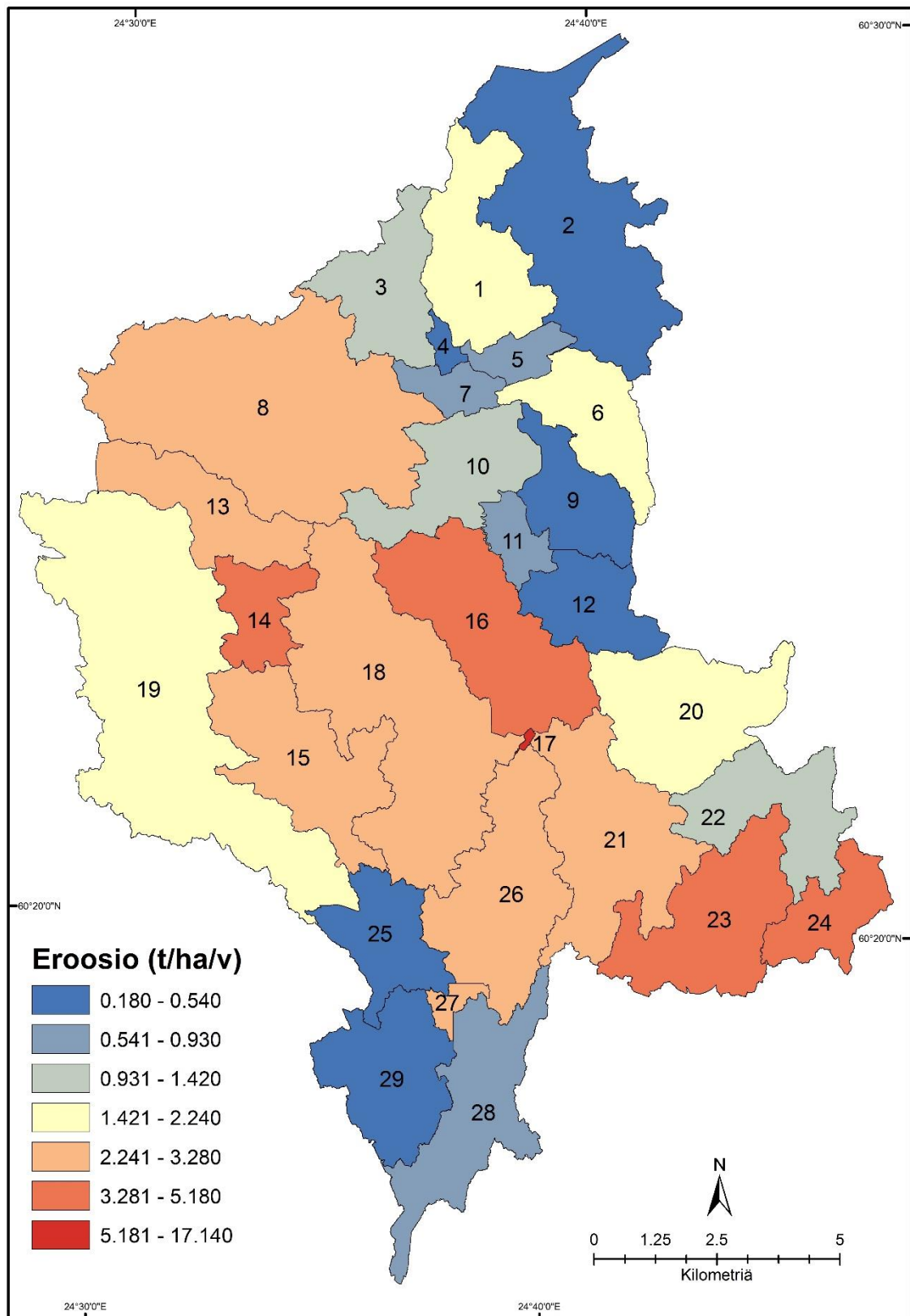
Valuma-alueilta uomaan liikkuneen sedimentin keskiarvo ennen kalibraatiota vuosilta 2007-2013 on esitetty taulukossa 8. Arvot vaihtelevat 0,01 ja 0,58 t/ha välillä. Kesäkuukausien eroosio on pientä. Talvella määrät ovat kaikkein korkeimmillaan. Kuvassa 18 näkyy eroosion määrän vaihtelu tutkimusalueen sisällä valuma-alueittain. Suurimmat määrät ovat peltovaltaisilla alueilla ja siellä, missä on asutuskeskittymiä. Matalimmat määrät sijaitsevat alueen eteläosissa, jossa on mm. luonnonsuojelualueita ja järviä. Kalibroimattoman mallin antamilla tuloksilla ei ole sinänsä arvoa, mutta ne otettiin mukaan vertailukohdaksi ja arvioimaan mallin toimintakykyä.



**Kuva 16.** Härkälänjoen mittauspisteeltä mitattu virtaama ja kalibroimattoman mallin vastaavat lukemat. Karkealla tasolla kalibroimaton malli pysyy ainakin arvojen mittasuhteiltaan oikeassa kokoluokassa, mutta matalan ja korkean virtaaman ajat ovat paikoin heikosti mallinnettuja.



**Kuva 17.** Lepsämänjoen alaosan mittauspisteen virtaamatiedot ja kyseisen valuma-alueen simuloidut arvot. Kuten Härkälänjoellakin, arvojen mittasuhteet ovat karkeasti oikein, joskin selkeitä yli- ja aliarviointoja on edelleen paljon.



**Kuva 18.** Kalibroimattoman mallin antamat eroosiotulokset osavaluma-alueittain. Osavaluma-alueella 17 havaitaan selkeästi suurimmat eroosiomäärät. Myös Lepsämänjoen alaosassa (osavaluma-alueet 23 ja 24) sekä osavaluma-alueilla 14 ja 16 määrät ovat suurimmat. Alhaisinta eroosio on kalibroimattomassa mallissa yleisesti tutkimusalueen reunoilla.

### 5.3 Kalibroitu virtaama ja eroosio kalibraation jälkeen

Härkälänjoen  $R^2$  kalibraation jälkeen oli 0,29 ja NS-arvo -0,05 (taulukko 10). Lepsämänjoen vastaavat arvot olivat 0,40 ja 0,34. Jostain syystä Härkälänjoki ja sen valuma-alue eivät reagoineet kalibrointiin yhtä hyvin kuin Lepsämänjoki (kuvat 19 ja 20). P- ja R-indeksit Härkälänjoen osalta olivat 0,33 ja 0,24, Lepsämänjoen osalta 0,32 ja 0,29.

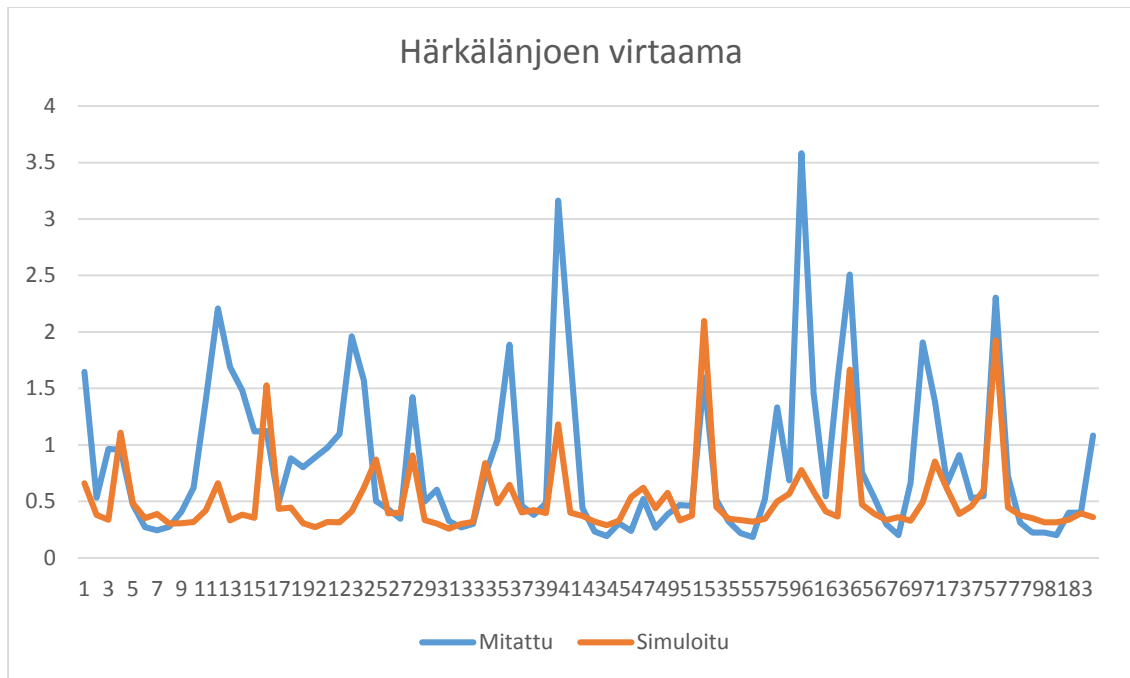
**Taulukko 10.** Kalibroidun virtaaman tilastolliset tunnusluvut. Verrattuna kalibroimattomaan malliin tunnusluvut paranivat selkeästi. Lepsämänjoki mallintuu Härkälänjokea paremmin. Arvot ovat kautta linjan parempia ja lähempänä mitattuja virtaamia. P- ja R-arvot jäivät kuitenkin suhteellisen alhaisiksi. Molempien uomien osalta mallin antamat lukemat kattavat noin 30% mitatuista, epävarmuuden ollen noin samaa luokkaa.

| Asema                  | P    | R    | $R^2$ | NS    | Mitattu ka<br>(m <sup>3</sup> /s) | Simuloitu<br>ka (m <sup>3</sup> /s) |
|------------------------|------|------|-------|-------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Härkälänjoki           | 0,33 | 0,24 | 0,29  | -0,05 | 0,85                              | 0,52                                |
| Lepsämänjoen<br>alaosa | 0,32 | 0,29 | 0,40  | 0,34  | 2,29                              | 1,75                                |

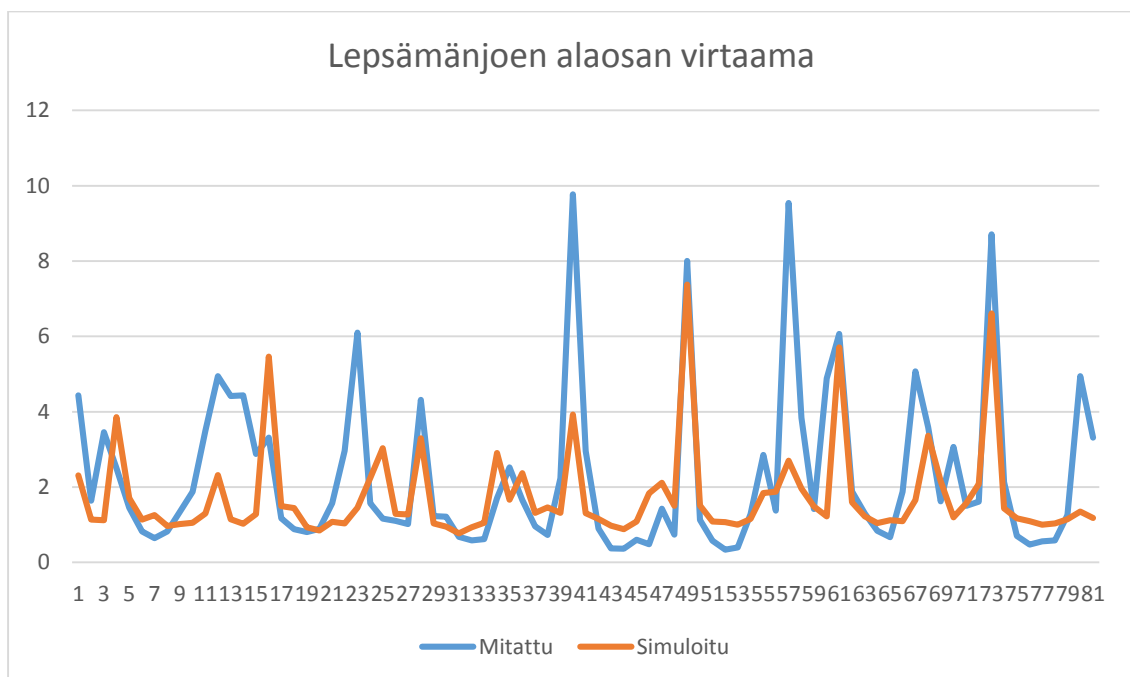
P- ja R-arvot molempien uomien osalta ovat lähes samat, tosin Lepsämänjoella hiukan paremmat. Kalibroidun mallin simulaatio tavoittaa 32-33 prosenttia mitatuista arvoista. Tuloksissa on Härkälänjoen osalta 24%:n ja Lepsämänjoen osalta 29%:n epävarmuus.

Kalibrointi päätettiin tähän pisteeseen kahdesta syystä. Lepsämänjoen tilastolliset tunnusluvut vähintäänkin lähestyivät kirjallisuudessa ilmeneviä arvoja ja olivat tyydyttäviä. Härkälänjoen osalta hyväksyttiin huonommat tunnusluvut. Toiseksi parametrien minimi- ja maksimi-arvot alkoivat lähestyä jo huomattavasti toisiaan. Kalibroinnin tavoitteena ei ollut löytää yksiselitteisesti parhaita arvoja, vaan sellainen väli, joka tavoittaa valuma-alueella tapahtuvan luonnollisen vaihtelun vuositason.

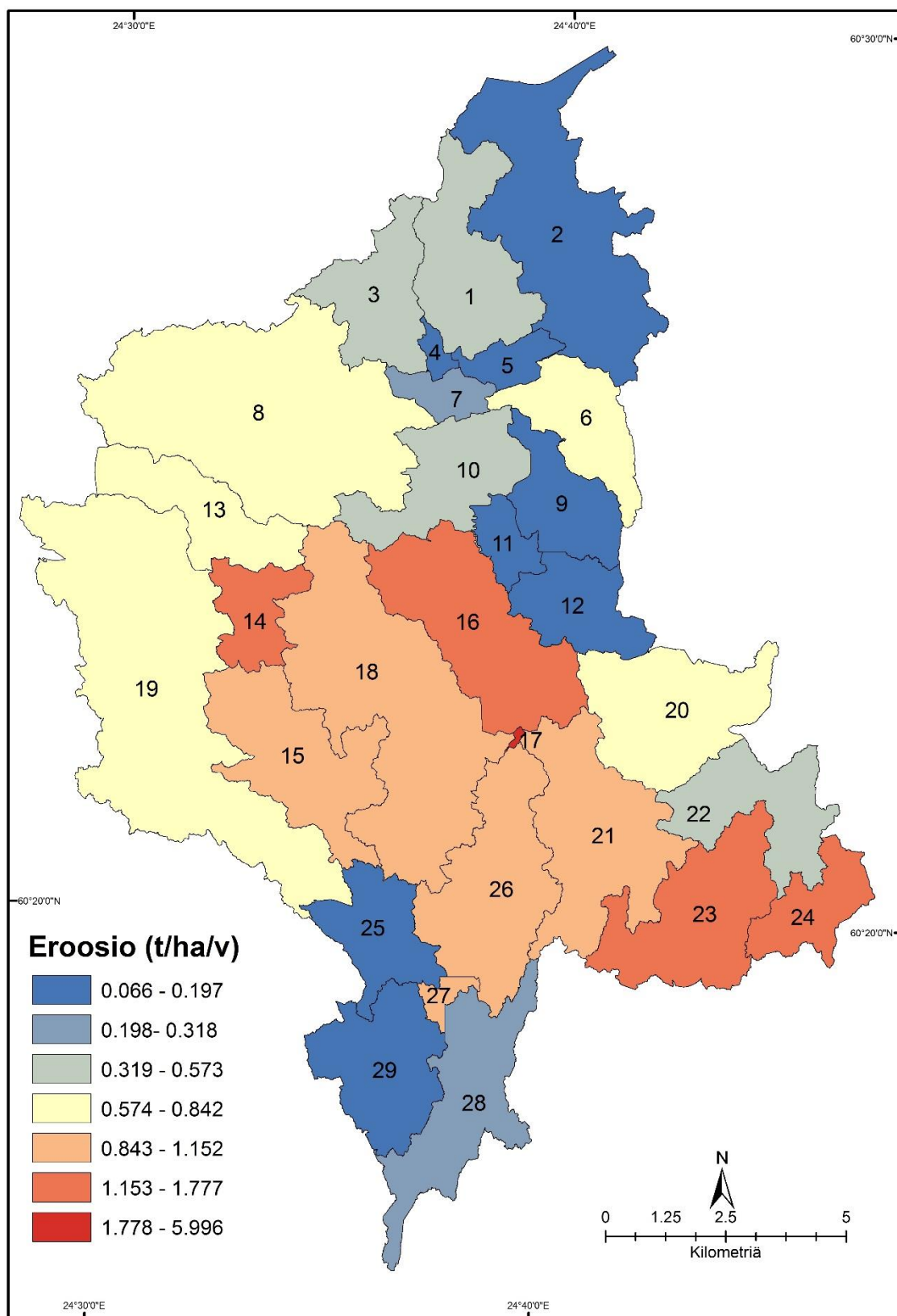
Eroosio valuma-alueittain kalibraatioajanjakson osalta on esitetty kuvassa 21. Verrattuna kalibroimattomaan malliin, sedimentin määrä pieneni huomattavasti. Suurimmat määrät ovat ala- ja keskijuoksulla. Alhaisimmat Lepsämänjoen yläosassa sekä tutkimusalueen reunoilla, missä on laajempia metsävaltaisia alueita.



**Kuva 19.** Kalibroidun mallin virtaama suhteessa mitattuihin arvoihin Härkälänjoen osalta. Alhaisen virtaaman jaksot ovat samaa luokkaa mitattujen arvojen kanssa, mutta virtaamapiikkien ennustaminen Härkälänjoen osalta jäi melko heikoksi.



**Kuva 20.** Kalibroidun mallin virtaama suhteessa mitattuihin arvoihin Lepsämänjoen alaosan osalta. Verrattuna Härkälänjokeen, Lepsämänjoen kalibroitu virtaama on paljon lähempänä mitattua. Kuvaajasta voidaan nähdä käytännössä kolme mitattua virtaamapiikkiä, joita malli ei tavoita. Alhaisen virtaaman jaksot ovat hyvin edustettuina.



**Kuva 21.** Eroosion määrä kalibraation jälkeen tutkimusalueella. Suurimmat määrät ovat valuma-alueen keskiosissa sekä alajuoksulla. Alhaisimmat Yläjuoksulla ja lähellä luonnonpuistoa ja luonnonsuojelualuetta, missä on laajempia metsävaltaisista alueita.

## 5.4 Virtaama ja eroosio validaation osalta

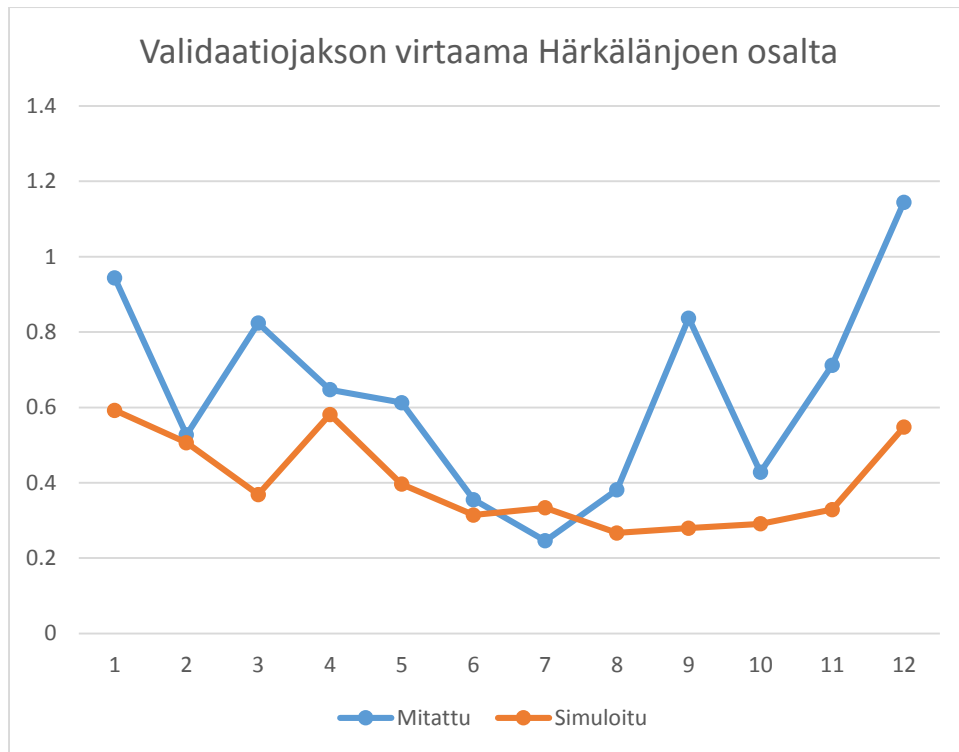
Malli kalibroitiin vuosien 2007-2013 perusteella. Validointiin käytettiin vuotta 2014. Sekä Härkälänjoelle että Lepsämänjoelle oli näin ollen 12 mitattua arvoa, joilla kalibroitua mallia testattiin. Tulokset on esitetty taulukossa 11 ja kuvissa 22 ja 23. Mittasuhteiltaan tulokset ovat kaksijakoiset. Verrattuna kalibraatioon molempien mittauspisteiden selitysaste parani, Härkälänjoen osalta tosin lähes merkityksettömästi. Härkälänjoen NS-arvo huononi kalibraatioon verrattuna selkeästi. Lepsämänjoen osalta tavoittavan valuma-alueen piirteet tyydyttävästi, sillä  $R^2$  ylitti 0,5:n ja NS-arvokin pysyi yli 0,2:n.

P-arvo kasvoi molempien uomien osalta selkeästi. Simulaatio tavoittaa Härkälänjoen osalta 42% ja Lepsämänjoen osalta 50% mitatuista virtaama-arvoista. Toisaalta myös R, eli simulaation epävarmuus, kasvoi huomattavasti.

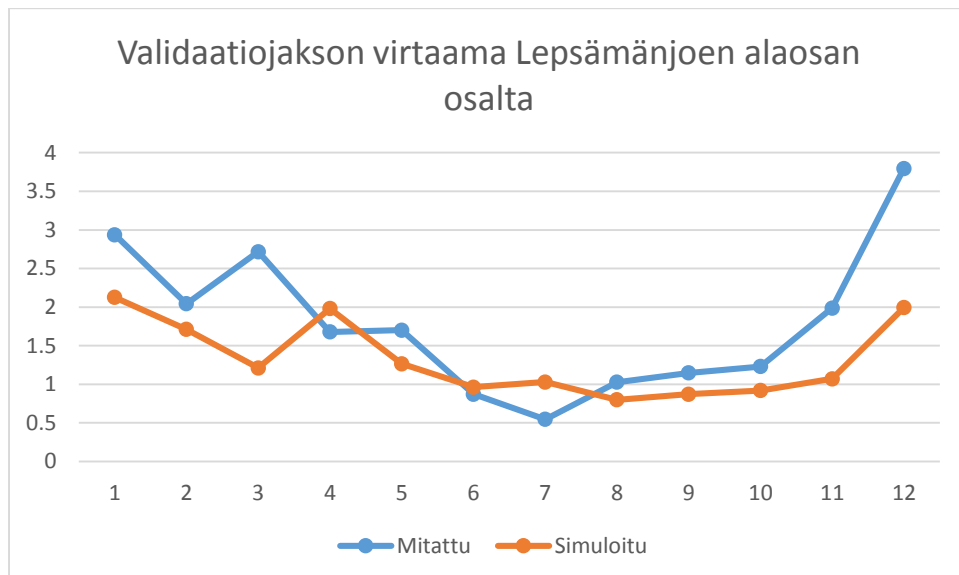
**Taulukko 11.** Simuloidun virtaaman tulokset validaatiojakson osalta. Härkälänjoen P-, R- ja  $R^2$ -arvot paranivat. NS kuitenkin laski jopa alemmaksi kuin ennen kalibraatiota. Lepsämänjoen arvot sen sijaan ovat kautta linjan tyydyttäviä, joskin myös sen NS-arvo laski verrattuna kalibraatioon.

| Asema                  | P    | R    | $R^2$ | NS    | Mitattu ka<br>(m <sup>3</sup> /s) | Simuloitu<br>ka (m <sup>3</sup> /s) |
|------------------------|------|------|-------|-------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Härkälänjoki           | 0,42 | 0,57 | 0,30  | -0,57 | 0,64                              | 0,40                                |
| Lepsämänjoen<br>alaosa | 0,50 | 0,63 | 0,54  | 0,21  | 1,81                              | 1,33                                |

Koko tutkimusalueen mittakaavassa eroosio oli erittäin pientä vuotena 2014, jota käytettiin validaatioajanjaksona. Eroosiota esiintyi vain talvikuukausina, ja silloinkin hyvin vähän. Kevät-, kesä-, ja syyskuukausina eroosiota ei ollut lainkaan. Tammikuun eroosio oli 0,13 t/ha, helmikuun 0,38 t/ha ja joulukuun 0,01 t/ha. Vuoden sedimentin saannon keskiarvo valuma-alueittain on esitetty kuvassa 24.

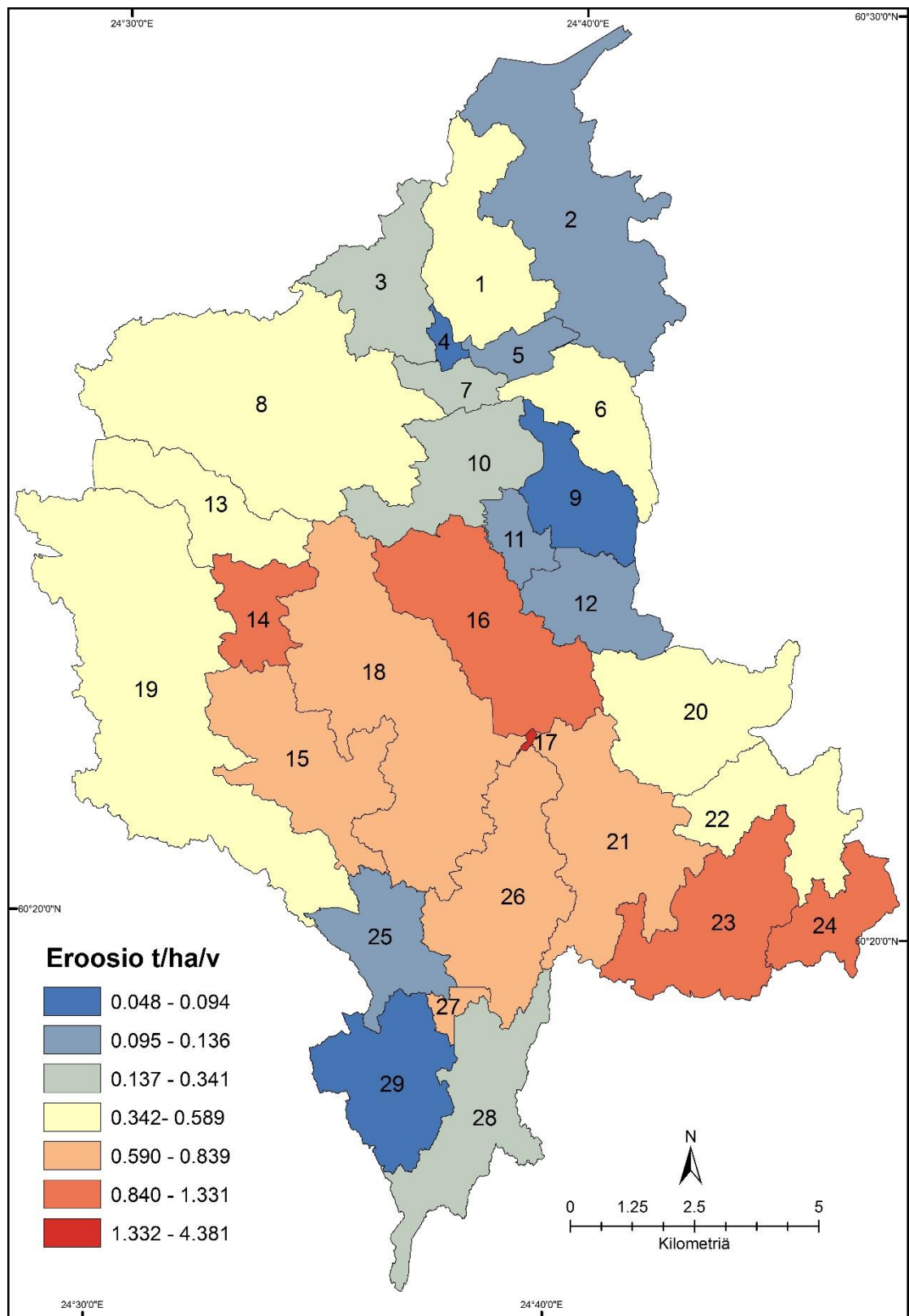


**Kuva 22.** Härkälänjoen mitattu virtaama ja virtaama validaatiojaksolta. Virtaaman mittasuhteet ovat suhteellisen hyvät, mutta validointi ei tavoita vuoden aikana tapahtuvaa vaihtelua aivan niin hyvin kuin olisi toivottavaa. Syksyn mallinnettu virtaama jää selkeästi mitattuja arvoja alemmaksi, eikä huomioi syyskuun virtaamapiikkiä lainkaan.



**Kuva 23.** Lepsämänjoen mitattu virtaama ja mallinnettu virtaama validaatiojakson osalta. Verrattuan Härkälänjokeen tulokset ovat parempia ja malli tavoittaa koko vuoden mittaisen vaihtelun jo suhteellisen hyvin.





**Kuva 24.** Eroosio validaatiojakson ajalta valuma-alueittain. Verrattuna kalibraatioon kokonaiseroosion määrä pieneni hieman.

## 5.5 Ilmasto RCP8.5-skenaarion mukaan

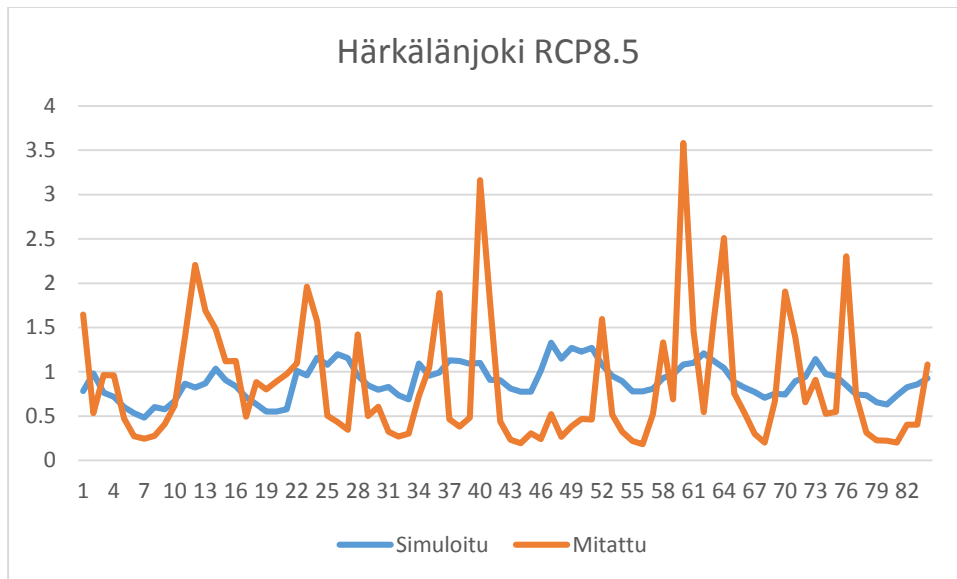
Validoituun malliin syötettiin RCP8.5-ennusteen mukaiset sademäärien ja lämpötilojen nousut, ja malli ajettiin uudelleen samoilla parametreilla. Keskimääräiset kuukausittaiset sademäärät on esitetty taulukossa 12. Sademäärät kasvoivat koko vuoden osalta noin 882 millimetriin ollen noin 235 mm enemmän kuin nykyään. Lumisateen määrä ja kuukaudet, joina lunta sataa, vähenivät. Lämpötilat pysyivät samoina kuin taulukossa 8.

**Taulukko 12.** RCP8.5-ennusteen mukaiset lukuarvot mallin ajamisen jälkeen.

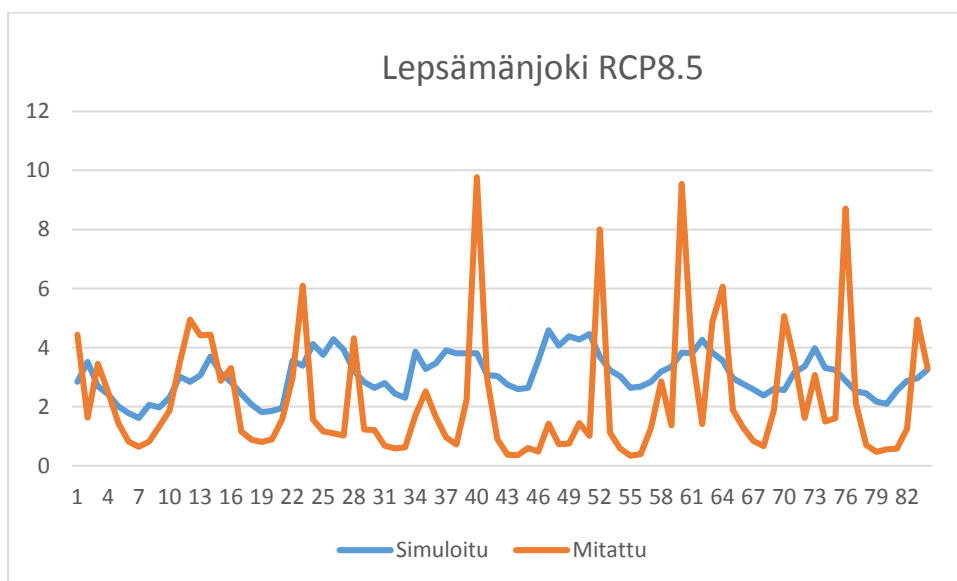
| kk       | Sademäärä nykyään (mm) | RCP8.5-sademäärä (mm) | Lumisade (mm) |
|----------|------------------------|-----------------------|---------------|
| 1        | 48,71                  | 85,35                 | 17,04         |
| 2        | 36,9                   | 53,83                 | 9,41          |
| 3        | 38,58                  | 58,7                  | 0,94          |
| 4        | 35,53                  | 48,32                 | 0             |
| 5        | 33,41                  | 50,32                 | 0             |
| 6        | 55,61                  | 81,86                 | 0             |
| 7        | 75,46                  | 84,32                 | 0             |
| 8        | 78,77                  | 79,29                 | 0             |
| 9        | 62,78                  | 64,68                 | 0             |
| 10       | 66,52                  | 100,72                | 0             |
| 11       | 64,66                  | 91,48                 | 0             |
| 12       | 55,52                  | 83,71                 | 2,88          |
| Yhteensä | 652,45                 | 882,58                | 27,39         |

## 5.6 Virtaama RCP8.5-skenaariossa

Vertailun vuoksi myös virtaama Härkälänjoen ja Lepsämänjoen osalta on esitetty kuvissa 25 ja 26 RCP8.5-ennusteen alaisuudessa. Silmiinpistävin seikka on virtaamapiikkien tasaantuminen ja lähes poistuminen kokonaan. Virtaama on tasaisempaa, lähes yhtä suurta, läpi vuoden.



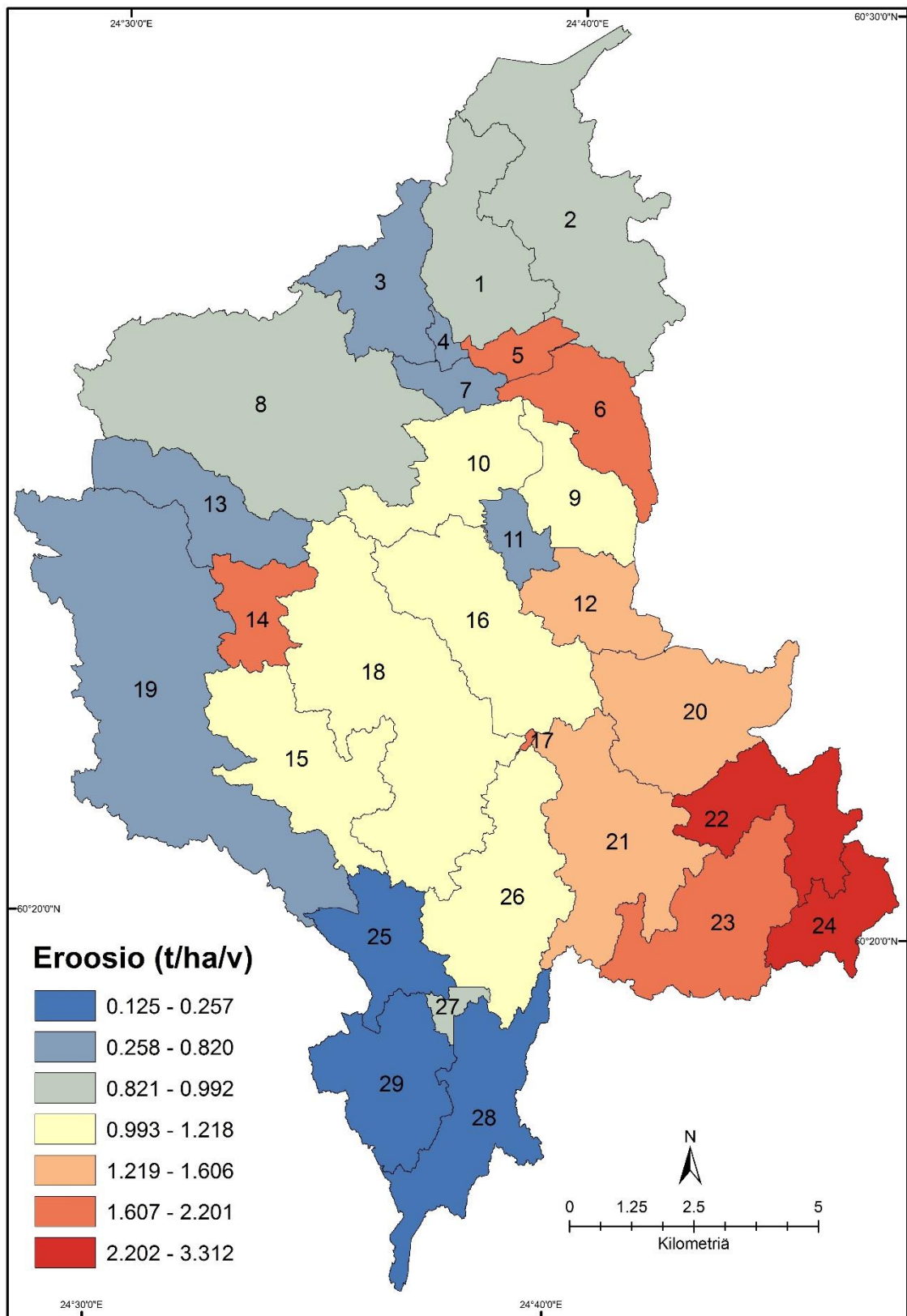
**Kuva 25.** Härkälänjoen virtaama ilmastomuutoskenaariossa. Huomiota herättävää on virtaaman tasaisuus verrattuna alkuperäisiin mittauksiin. Vastaavanlaisia piikkejä ei ole enää ollenkaan.



**Kuva 26.** Härkälänjokea vastaava trendi näkyy myös Lepsämänjoen osalta.

### 5.7 Eroosion määrä RCP8.5-skenaariossa

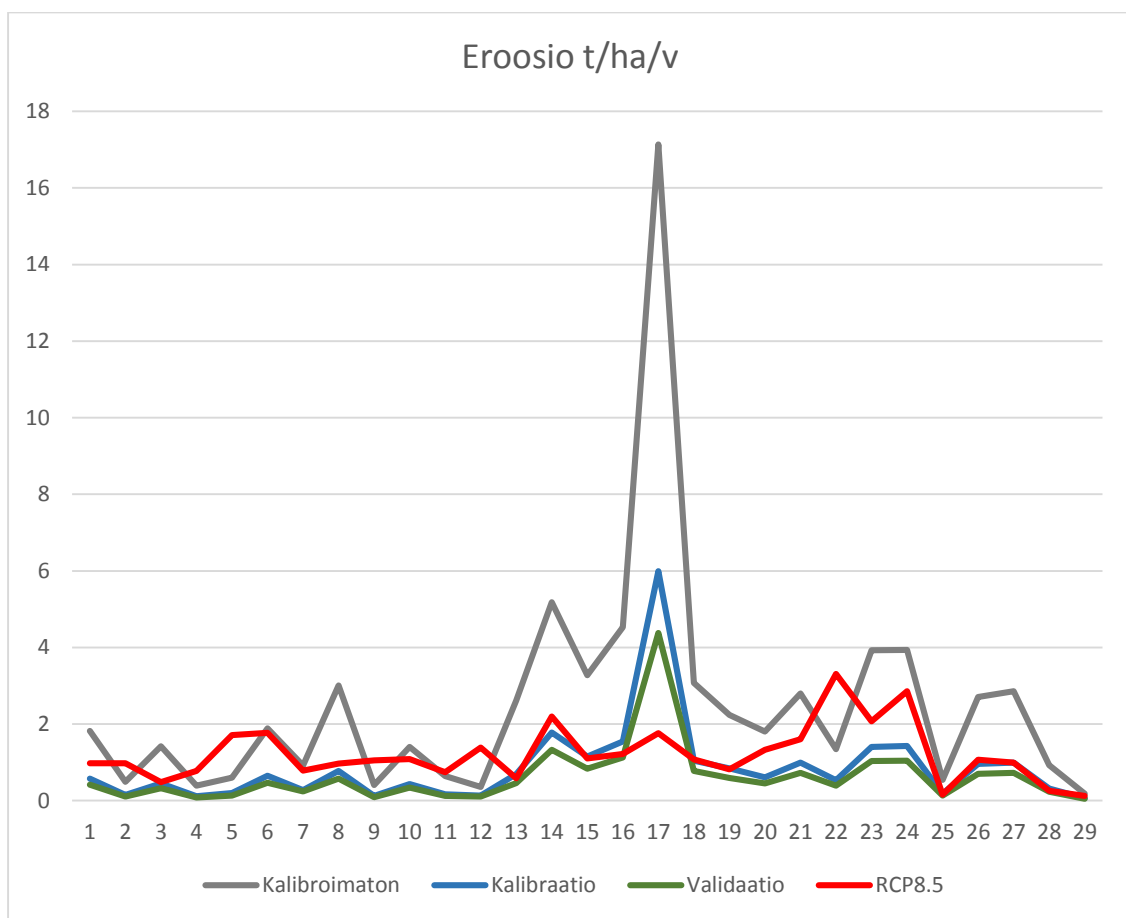
Kokonaisuutena eroosion määrä kasvoi sademäärien ja lämpötilojen noustua. Koko tutkimusalueen vuoden keskiarvo eroosiolle on 1,22 t/ha. Määrät tarkemmin valuma-alueittain on esitetty kuvassa 27. Varsinaista alueellista muutosta ei ole tapahtunut. Korkean ja matalan eroosion valuma-alueet ovat pääsääntöisesti samoja kuin nykyään.



**Kuva 27.** Ilmastonmuutosskenaarion eroosiotulukset tutkimusalueella.

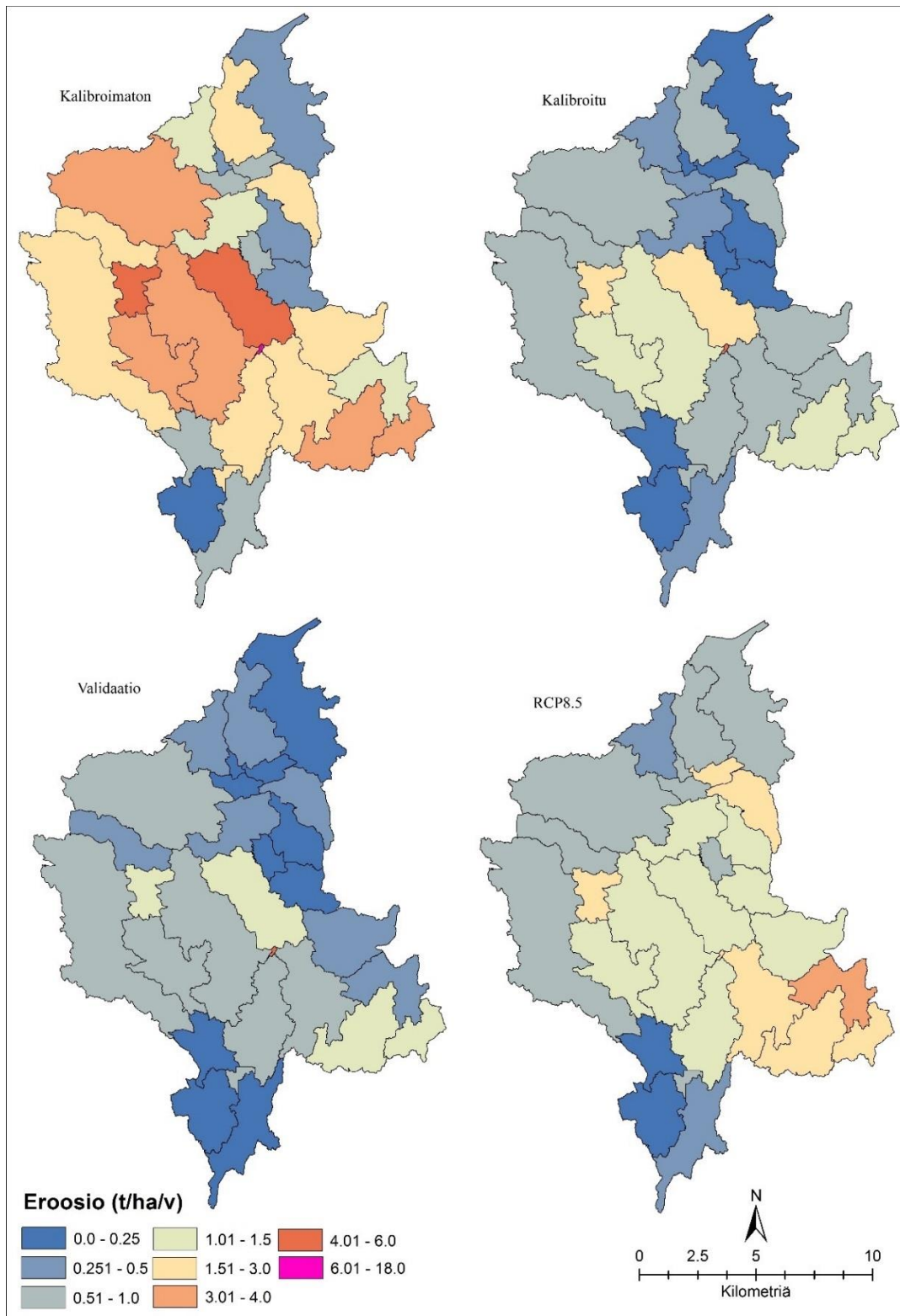
## 5.8 Tulosten koonti

Sedimentin määrän muuttuminen kalibroimattomasta mallista RCP8.5-skenaarioon on esitetty kuvassa 28. Kalibraatio- ja validaatiojaksojen määrät kulkevat käsi kädessä, kalibraatiojakson saadessa hieman korkeampia lukemia. Kalibroimaton malli vaihtelee paljon enemmän, ja valuma-alueen 17 kohdalla nähdään valtava piikki. Sama nousu on tosin nähtävissä myös kalibraation ja validaation osalta. RCP8.5-ennusteessa tätä piikkiä ei nähdä. Sen sijaan tulokset ovat muuten suurempia.



**Kuva 28.** Eroosion määrän muutos kalibroimattomasta mallista ilmastomuutosskenaarioon valuma-alueittain. Valuma-alueen 17 suuri eroosiolukema saatiin pienenemään kalibraatiossa ja validaatiossa, ilmastomuutosennusteessa sitä ei enää ole lainkaan.

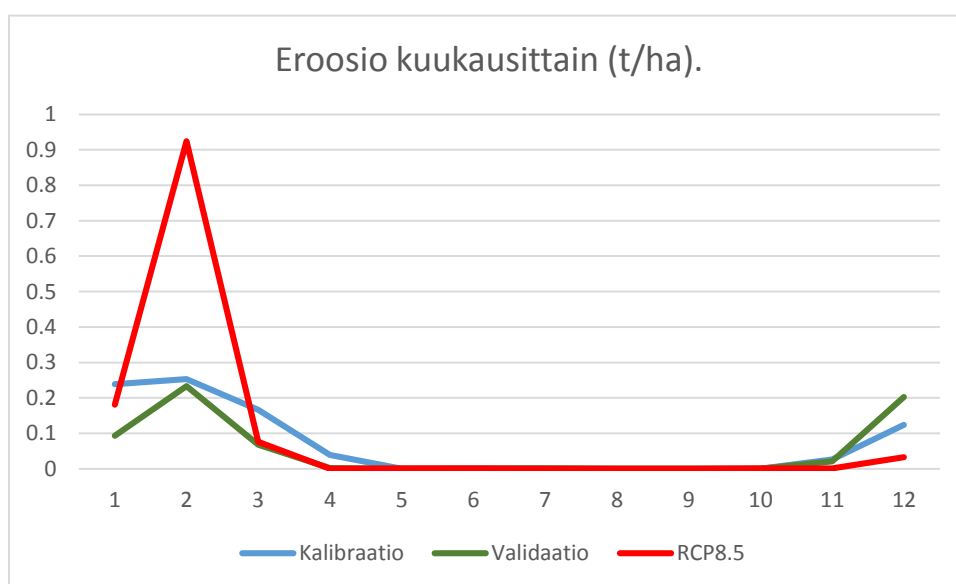
Kuvassa 29 näkyy eroosion määrän muutos valuma-alueittain ja taulukossa 13 ja kuvassa 30 kuukausittain koko tutkimusalueella.



**Kuva 29.** Yhteenveto eroosion määrän muutoksesta valuma-alueittain. Kalibroimattomassa mallissa eroosiomäärät ovat kaikkein suurimpia, mutta kalibraation jälkeen lukemat tasoittuvat huomattavasti. Verrattuna nykytasoon eroosio kasvaa eniten alajuoksua lähellä olevilla valuma-alueilla. Vesistöalueen reunoilla ja muutos on pienintä.

**Taulukko 13.** Kuukausittaiset keskimääräiset eroosiotulokset tutkimusalueella (t/ha). Validaation kokonaiseroosio on kalibraatiota pienempää, RCP8.5-ennusteessa kaikkein suurinta. Helmikuun osuus tästä on merkittävä.

| kk       | Kalibraatio | Validaatio | RCP8.5   |
|----------|-------------|------------|----------|
| 1        | 0,238788    | 0,092931   | 0,180644 |
| 2        | 0,253044    | 0,233034   | 0,924057 |
| 3        | 0,166187    | 0,067862   | 0,075793 |
| 4        | 0,038685    | 0,00231    | 0,000385 |
| 5        | 0,000217    | 0,000172   | 0,000569 |
| 6        | 0,000724    | 0,000276   | 0,000759 |
| 7        | 0,000571    | 0,000586   | 0,000132 |
| 8        | 0,000133    | 0          | 2,87E-05 |
| 9        | 9,85E-05    | 6,9E-05    | 4,6E-05  |
| 10       | 0,00035     | 0,000103   | 0,000816 |
| 11       | 0,026468    | 0,020862   | 0,000736 |
| 12       | 0,123931    | 0,202862   | 0,032213 |
| Yhteensä | 0,849197    | 0,621069   | 1,216178 |



**Kuva 30.** Eroosion määrä kuukausittain kalibraatio- ja validaatiojakson osalta sekä ilmastonmuutosskenaariossa. Eroosio on selkeästi suurinta marraskuusta maaliskuuhun, ollen korkeimmillaan helmikuussa. Kesäkuukausina eroosio on lähes olematonta. Helmikuun merkitys eroosion kokonaismäärälle on suuri. Erityisesti RCP8.5-ennusteessa sen osuus on yli 75%.

## 6. Tulosten tarkastelu

### 6.1 Ilmastonmuutoksen vaikutus eroosion määrään

Tässä tutkielmassa pyrittiin etsimään vastausta siihen, miten ja kuinka paljon niin sanottu globaalimuutos vaikuttaa eroosion määrään eteläsuomalaisella valuma-alueella. Vaikutusta arvioitiin käyttämällä ilmaisia paikkatietoaineistoja sekä SWAT-mallia. Vastaavaa mallintamista on Suomessa tehty melko vähän, tosin aihetta läheisesti sivuavia tutkimuksia on julkaistu. Lisäksi eroosiota on tutkittu Suomessa muin menetelmin. Eroosion määrän mallintaminen perustui SWAT-mallin kalibroimiseen virtaaman perusteella, mikä on yleinen menetelmä kyseistä mallia käytettäessä (Neitsch et al. 2011; Abbasbour 2015). Mallin hyvyuden mittareiksi valittiin P- ja R-indeksit sekä  $R^2$  ja NS.

Yleisellä tasolla eroosio kasvaa, kun sademäärä ja lämpötila kasvavat. Verrattuna kalibraatioon kasvua oli n. 43% ja verrattuna validaatioon n. 94%. Tuloksena tämä on saman suuntainen kuin muissa ilmastonmuutosta ja eroosiota käsitelleissä tutkimuksissa. Kasvu ei kuitenkaan ole lineaarista, vaan siihen sisältyy huomattavia temporaalisia ja spatiaalisia vaihteluita. SWAT-mallin perustana on veden kierto valuma-alueella, joten eroosion määrää on perusteltua tarkastella virtaaman, toisin sanoen sademäärän, muutoksen näkökulmasta. Nykyään virtaamassa on havaittavissa selkeät vuodenaikaisvaihtelut. Talvi- ja kesäkuukaudet ovat matalan virtaaman aikaa, keväisin ja syksyisin virtaama kasvaa ja mittaustuloksissa näkyy virtaamapiikkejä. RCP8.5-ennusteen olosuhteissa tämä vuodenaikaisvaihtelu näyttää katoavan lähes kokonaan. Virtaama tasoittui koko vuoden osalta molemmilla valuma-alueilla, joilta oli mitattua virtaamatietoa. Tämän voidaan olettaa pätevän koko tutkimusalueella, sillä mittausasemat eivät sijaitse vierekkäin ja niiden virtaama on eri kokoluokassa.

Virtaaman tasoittuminen ei kuitenkaan vaikuta eroosion määrään samalla tavalla (kuva 30). Valtaosa eroosiosta näyttää edelleen tapahtuvan alkutalvesta, ja verrattuna nykytasoon silloin se myös kasvaa eniten (taulukko 13). Muun vuoden eroosio on erittäin pientä. Trendi on kuitenkin mallin puitteissa sama kautta jokaisen tarkastelujakson (kalibroimaton, kalibroitu, validoitu ja RCP8.5) aikana. Vettä siis valuu pintavaluntana muina kuukausina niin vähän, että eroosiota ei tapahdu. Tämä on vastoin yleistä käsitystä siitä, että kevään ja syksyn sateiden ja myrskyjen aikana irtoavan aineksen määrä olisi



suurin tai se kasvaisi (esim. Bourauai et al. 2006, Puustinen et al. 2006). Loppusyksyn jälkeen marras- ja joulukuussa eroosio kääntyy taas kasvuun.

Virtaaman läpivuotinen tasaisuus ja eroosion keskittyminen edelleen samoille kuukausille kuin nykyisessä ilmastossa on ongelmallista. Olisi loogista olettaa, että koska uomassa virtaa tasaisemmin vettä läpi vuoden, myös ainesta kulkeutuisi uomaan tasaisemmin läpi vuoden kasvaneen sadannan seurauksena. Tilastollisten tunnuslukujen ollessa tyydyttäviä virtaaman osalta (taulukko 11), huomio kiinnittyy eroosion ja sedimentin kulkeutumisen mekanismeihin sekä satavan veden liikkeeseen ja varastoitumiseen. Taulukossa 7 esitettiin 16 kalibroitua parametria. On mahdollista, että kalibroinnissa sorruttiin ns. ”yliparametrisointiin”, jolloin eri parametrien antamat signaalit sekoittuvat toisiinsa. Muuttujien vähentäminen olisi saattanut parantaa eroosion määrän temporaalista vaihtelua virtaaman tilastollisten tunnuslukujen kustannuksella. Parametrit ovat yhteydessä toisiinsa, ja samaan lopputulokseen on mahdollista päästä monilla eri parametrien ja parametrien arvojen yhdistelmillä (Morgan & Nearing 2011).

Jotkin parametreista ovat vähemmän oikeata maailmaa vastaavia kuin olisi toivottavaa. Kyseiset parametrit eivät kuitenkaan niinkään säätele veden varastoitumista tai vähennä sen määrää. Veden haihtumista tai vähenemistä kasvien käyttämisen toimesta säätelevät parametrit ESCO, SOL\_AWC ja EPCO ovat itsenäisen kalibroinnin jälkeen hyvin lähellä samoja arvoja kuin Tattari et al. (2009) tutkimuksessa.

## **6.2 Eroosiota kontrolloivat tai kasvattavat tekijät**

Kuvissa 21, 24 ja 27 on esitetty eroosion määrä valuma-alueittain nykyisissä olosuhteissa sekä tutkielmassa käytetyn ilmastomuutosskenaarion alla. Kuva 29 on kokoava vertailukuva eroosiotuloksista. Muutos, ts. eroosioherkkyys, voidaan jakaa neljään osa-alueeseen. Eteläosissa, valuma-alueilla 25, 28, 29 ja 27, eroosio on pienintä RCP8.5-ennusteessa. Näiden valuma-alueiden pääasiallisena maalajina on kalliomaa ja maanpeitteenä havumetsät sekä vesialueet. Muita luokkia, kuten maanviljelysalueita tai lehtimetsiä, on vähän.

Vesistöalueen pohjoiset ja läntiset reunaosat ovat myös muuta aluetta vähemmän herkkiä eroosiolle. Hallitseva maalaji pohjoisosissa on savimaa, mutta myös kalliomaa on vallitseva. Aivan pohjoisreunassa sijaitsevat myös laajimmat hiekka-alueet. Muutos verrattuna validaatiojaksoon on kuvassa 29 lähes olematon näillä alueilla, mutta jos tarkastellaan kuvia 24 ja 27 huomataan, että arvot ovat ilmastomuutosskenaariossa

kuitenkin selkeästi suuremmat. Edellisiä alueita suurempi muutos arvoissa havaitaan karkeasti vesistöalueen keskiosissa, missä on paljon maanviljelyä sekä sekametsää. Vallitsevat maalaji on savimaa. Eroosioherkimmät alueet sijaitsevat pääasiassa lähellä alajuoksua ja vesistöalueen purkupistettä. Havumetsiä ei ole, vaan metsät ovat lehti- tai sekametsiä ja niitä ympäröivät erilaiset ihmistoiminnan alueet tai maatalouskeskittymät.

Havumetsillä näyttää siis olevan eroosiota hillitseviä ominaisuuksia. Oletettavasti lumi-jää- ja routajaksojen vähetessä ja puuttuessa ikivihreät metsät suojaavat maaperää muita metsätyyppejä paremmin sateen ja pintavalunnan erosionaaliselta voimalta. Lisäksi alueilla sijaitsevat vesistöt eivät luonnollisesti voi kärsiä eroosiosta. Alueilla vallitsevana oleva kalliomaa myös vähentäne eroosiopotentiaalia.

Muilta alueilta on hankalampi löytää selkeitä eroosiota lisääviä tai kontrolloivia tekijöitä. Alajuoksun suuremmat eroosiolukemat eivät selity sillä, että ainesta kulkeutuisi sinne yläjuoksulta. SWAT mallintaa HRU:ista uomaan liikkuneen aineksen määrän jokaisen osavaluma-alueen sisällä erikseen. Yksi mahdollinen selitys on kalibrointiin ja validointiin käytetyn mittausaseman läheisyys. Mahdollisesti suuremmat arvot ovat seurausta mallin tarkemmasta ennustekyvystä aseman läheisyydessä.

### **6.3 SWAT-mallin käyttökelpoisuus**

Kolmas tutkimuskysymys etsi vastauksia siihen, miten SWAT-malli suoriutuu eroosion mallintamisesta Suomen olosuhteissa ja miten helposti saatavilla olevat paikkatietoaineistot soveltuvat eroosiotutkimukseen. Malli kehitettiin Yhdysvalloissa Teksasissa maatalouden tarpeisiin, missä olosuhteet poikkeavat Suomesta. Suomessa SWAT-mallia käytettäessä se on saanut osakseen kritiikkiä, muun muassa Bärlund et al. (2007) ja Tattari et al. (2009) pohtivat mallin käyttökelpoisuutta tutkiessaan ravinteiden kulkeutumista ja kiintoaineksen määrää.

Verrattaessa tuloksia puhtaasti aiempiin eroosiota käsitteleviin tutkimuksiin, jotka ovat antaneet määrällisiä arvioita eroosiosta Suomessa, eroosion kokonaismäärä on samassa luokassa. Kalibraatio- ja validaatiojakson vuoden eroosion määrä oli noin 0,85 ja 0,62 tonnia hehtaarilla, mikä on lähellä Mansikkaniemen (1982) arvioimaa 50 tonnin vuosikeskiarvoa. Toisaalta määrät jäivät kauaksi kyseisen tutkimuksen suurimmista arvoista (5,6 t/ha/v). Aura et al. (2006) arvioivat savimaiden eroosioksi 1-2 t/ha/v. Samalle tasolle päästään tutkimusalueen valuma-alueilla, joiden pääasiallinen maalaji on savi (liite 3, kuvat 21 ja 24). Puustinen et al. (2006) selvittivät ravinteiden ohella eroosion

määrää kolmella Etelä-Suomessa sijaitsevalla valuma-alueella. Tulokset eroosion määrästä vaihtelivat noin 0,2-2,9 t/ha välillä vuodessa.

Vuoden sisäinen kuukausittainen vaihtelu on tuloksissa heikkoa kautta linjan. Kysymys kuuluukin, johtuuko tämä aineistojen ongelmista ja epätarkkuuksista, mallin parametrisoinnin virheellisyydestä vai koko mallin yleisestä kykenemättömyydestä tavoittaa temporaalista vaihtelua eroosion määrässä Suomessa. Kirjallisuudessa tarkkojen arvioiden puute laajalti kertonee myös siitä, ettei niillä itsellään ilman kontekstia ole merkitystä. Arviot eroosioherkkyydestä ja aiheeseen läheisesti liittyvästä ravinteiden määrästä asettavat ilmiön pohdittavaan, sovellettavaan ja ratkottavaan yhteyteen.

SWAT-malli arvioi tutkimusalueella tapahtuvan kokonaiseroosion määrää onnistuneesti. Vuoden kokonaismäärät vastaavat maltillisesti kirjallisuutta. Eri maalajien ja maanpeitteiden vaikutus on ilmeinen, joskin ei yksiselitteinen. Tutkimuksesta käy kuitenkin ilmi, että jotta SWAT-mallia voisi entistä tehokkaammin hyödyntää Suomen olosuhteissa, vaatisi se parempien ominaisuustietokantojen olemassaoloa. Tämän toteaa myös Bärlund et al. (2007). Askelia yhtenäisten protokollien aikaansaamiseksi on jo tehty (Pagliero et al. 2011).

## **6.4 Epävarmuuden lähteet**

### **6.4.1 Aineistojen virhelähteet**

Käytetty ilmastoaineisto sisälsi vain kaksi sääasemaa. Vaikka toinen niistä sijaitseekin tutkimusalueella ja toinen aivan sen läheisyydessä, kattavampi kuvaus paikallisilmastosta olisi saattanut parantaa kuukausien tai jopa päivien välistä vaihtelua. Toisaalta tutkimusalue on niin pieni, ja ympäröivä alue niin tutkimusaluetta vastaava, että merkittävää mesoilmaston vaihtelua tuskin on. Tästä huolimatta aineisto on perusteiltaan simulaatio globaalilla tasolla tehdyistä mittauksista ja arvioista, ei tutkimusalueelta mitattua tietoa. Tämä näkyi sademäärien yliarvioinnissa. Tästä johtunut kuukausittaisten sademäärien manuaalinen korjaus on ilmastoaineistoon toinen liittyvä virhelähde. Kyseinen ominaisuus, eli sademäärien ja lämpötilojen korjaus, on sisäänrakennettu ominaisuus SWAT:issa, mutta dokumentaatio ei tarkalleen kerro miten se operoi mallin sisällä ja kuinka malli esimerkiksi laskee päivittäisiä sademääräarvoja korjauksen jälkeen. Lopputulos kuitenkin vastasi taulukossa 1 esitettyjä Mutilan havaintoja, ja toisaalta mallinnuksen temporaalinen tarkkuus oli kuukausi.

Maaperäaineiston pinnan tason spatiaalinen tarkkuus on erittäin hyvä, mutta selostusta esimerkiksi maaperäkerrosten paksuudesta ei ollut. Lisäksi SWAT:n vaatimia maaperän ominaisuustietoja ei aineiston mukana tullut. Täten ne jouduttiin keräämään vaihtelevista lähteistä, lähinnä Pohjoismaissa tai Suomessa tehdyistä tutkimuksista. Joidenkin tietojen osalta jouduttiin soveltamaan muun muassa USA:sta kerättyjä maaperätietoja, joidenkin osalta tyydyttiin käyttämään mallin oletusarvoja. Maaperän oletettiin olevan pinnasta pohjaan samaa, mikä ei välttämättä pidä paikkaansa.

Korkeusmallin hyvä tarkkuus mahdollisti valmiin uomatietokannan tarkentamisen ja SWAT:iin viemisen. Toisaalta kysymysmerkiksi jäi se, kuinka tarkalle tasolle tutkimusalueella olevat uomat pitäisi mallintaa. Tutkielmassa jätettiin pois kaikkein pienimpien uomien, kuten peltojen sisällä olevien ojien, mallintaminen. Lisäksi tutkimusalueella olevia muutamia järviä ei otettu huomioon lainkaan.

#### 6.4.2 Menetelmien virhelähteet

SWAT-malli kalibroitiin ennustamaan eroosiota muuttuvassa ilmastossa kahden virtaamamittauspisteen perusteella. Mittauspisteet olivat ainoat tutkimusalueen sisällä, jotka sisälsivät tarpeeksi yhtenäistä aineistoa. Vaikka ne eivät sijaitsekaan vierekkäin, samalla valuma-alueilla tai edes viereisillä valuma-alueilla, sijaitsevat ne silti suhteellisen lähellä toisiaan. Ideaalitapauksessa kalibrointiin olisi käytetty ainakin kolmea mittauspistettä ylä-, keski- ja alajuoksulta. Mittauspisteiden valuma-alueet ovat lisäksi ainakin maankäytöltään ja -peitteeltään suhteellisen samanlaisia. Olisi ollut hyvä saada esimerkiksi mittaussarja virtaamasta valuma-alueella, jonka pääasiallinen maankäyttö on maanviljely. Yleisesti spatiaalinen autokorrelaatio jäi liian vähälle huomiolle tutkimusasetelmassa.

Tyydyttävien tilastollisten tunnuslukujen tavoittelussa jouduttiin hieman tinkimään siitä, kuinka hyvin kalibroittavien parametrien arvot vastaavat todellista maailmaa. Kalibrointi päätettiin täten kompromissina näiden kahden tekijän väliltä pisteeseen, jossa molemmat olivat vielä tyydyttäviä. Kalibraatiossa suoritettujen iteraatioiden määrä itsessään on kirjallisuutta vastaava, mutta niiden sisäinen simulaatioiden määrä (100 kpl/iteraatio) on hieman suositeltua vähemmän johtuen simulaatioiden laskennallisesta raskaudesta ja pitkästä kestosta.

Sedimentin määrää uomissa ei kalibroitu lainkaan. Tämä on luultavasti tutkielman suurin epävarmuutta aiheuttava tekijä. Tähän päädyttiin kolmesta syystä. Mallintaminen

SWAT:lla perustuu nimenomaan veden liikkeeseen ja kiertokulkuun valuma-alueella, ja toiseksi hydrologiaan liittyviä aineistoja oli yksinkertaisesti paremmin saatavilla. Kolmanneksi alustavat mallin ajot antoivat Suomen olosuhteisiin nähden tyydyttäviä eroosiotuloksia ilman kalibraatiota. Sedimentin määrän, eli epäsuorasti eroosion, ohella SWAT simuloi uomassa olevaa kiintoainesta (*TSS, Total Suspended Solids*), mutta korrelaatio sen ja Härkälänjoelta ja Lepsämäjoelta mitattujen kiintoainemäärien kanssa oli liian kyseenalainen. Sedimenttiaineiston puute otettiin huomioon kalibroimalla vain virtaamaan liittyviä parametreja.

Validaatiojakson lyhyys (yksi vuosi) verrattuna kalibraatioon (seitsemän vuotta) ilmeni potentiaalisena virhelähteenä vasta myöhemmin. Teoriassa validoinnin tarkoitus on nimenomaan tarkastella mallin suoritumista ja ennustamiskykyä ”missä vain” tilanteessa millä vain ajanjaksolla. Vuosien välinen vaihtelu sademäärissä ja lämpötiloissa sekä niiden temporaalisessa sijoittumisessa suhteessa edeltävään tai seuraavaan vuoteen Etelä-Suomessa voi kuitenkin olla kohtalaista. Täten mallin validoiminen yhtä monella vuodella kuin kalibraatio olisi saattanut olla parempi ratkaisu.

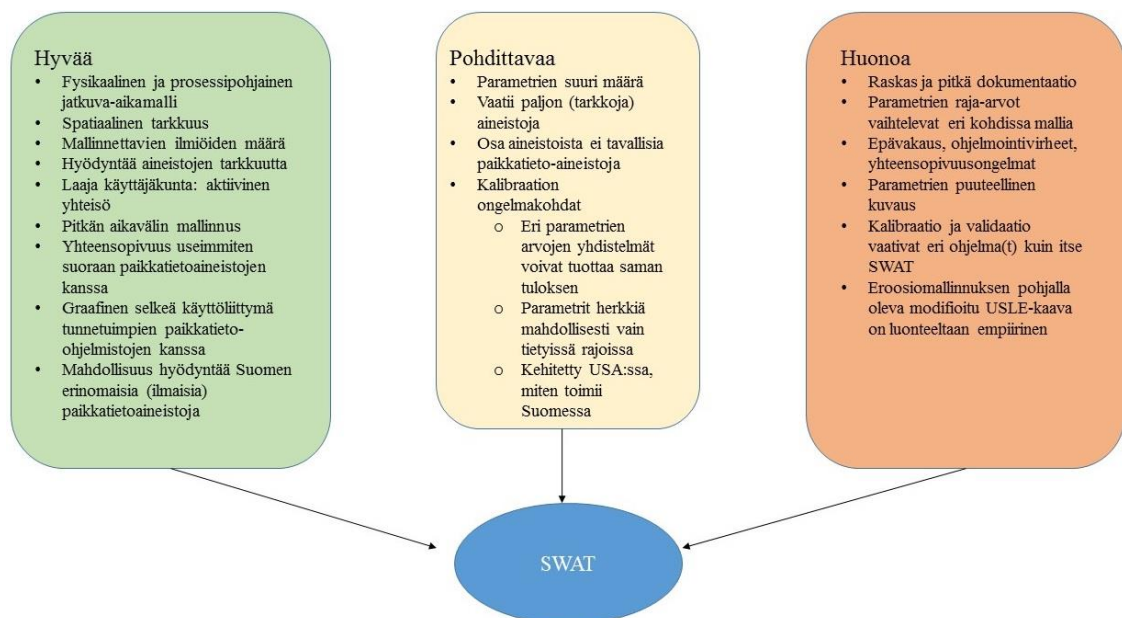
Ilmastonmuutoksen mallintaminen vain kahden muuttujan, sademäärän ja lämpötilan, kuukausittaisen muutoksen perusteella on karkea yksinkertaistus ilmiön valtavasta kompleksisuudesta. Lisäksi tutkimusasetelmassa oletettiin maankäytön pysyvän nykyisenlaisena, mikä ei välttämättä pidä muuttuneessa ilmastossa ja alueen yhteiskunnallisessa kehityksessä paikkaansa.

SWAT-malli on erittäin monipuolinen, mutta kompleksinen, kokonaisuus (kuva 31). Graafinen käyttöliittymä ja yhteensopivuus suosituimpien paikkatieto-ohjelmistojen kanssa tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon valuma-aluepohjaiseen ilmiöiden tarkasteluun ja ongelmien tutkimiseen. Mallina se ei kuitenkaan vielä ole läheskään valmis. Tämä ilmenee jatkuvina yhteensopivuusongelmina ja virheilmoituksina, ohjelman kaatuiluna, dokumentaation puutteellisuutena ja eriävinä muuttujien kuvauksina ja arvoina ohjelman sisällä eri paikoissa. Lisäksi malli itsessään on melko kömpelö laajojen aineistojen käytössä ja muokkaamisessa, ja vaatiikin lisäohjelmia muun muassa kalibrointiin, validointiin ja parametrien uudelleensyöttämiseen ja -parametrisointiin. Tästä aiheutuu usean eri tietokannan ristikkäistä käyttämistä, tiedostopolkujen selausta ja manuaalista tietojen kopioimista ja päivittämistä. Mitä enemmän aineistoja, parametreja ja tuloksia joudutaan ohjelman ulkopuolella

muokkaamaan ja siirtämään, sitä enemmän virheen todennäköisyys kasvaa. Kompleksisuuden seurauksena on mahdollista, että tutkielmassa on jätetty liian vähälle huomiolle tai jätetty huomioimatta lainkaan merkittäviä yhteyksiä eri prosessien, muuttujien ja aineistojen välillä.

Fysikaalisissa malleissa on ongelmia yleisesti (Merritt et al. 2009). Vaikka ne teoriassa ovat sujuvasti skaalautuvia eri kokoisien valuma-alueiden tutkimiseen, niiden prosessien ja laskentatapojen perustana toimivat yhtälöt on laadittu lähtökohdiltaan pienien alueiden perusteella ja tiettyjen olosuhteiden vallitessa. Mallien skaalautuvuus eri kokoisille valuma-alueille on siksi kyseenalaista. Lisäksi virheiden määrä kertaantuu aina, kun eri kokoisia spatiaalisia elementtejä käytetään ja yhdistetään ja kun niitä muutetaan toisiksi esimerkiksi tuloksia tarkasteltaessa.

Fysikaalisten mallien, kuten SWAT:in, idea ja perustelut suhteessa empiirisiin malleihin on selitetty aikaisemmin. Kuitenkin yksi mallin pääkomponenteista, MUSLE-kaava, on luonteeltaan ja lähtökohdiltaan empiirinen (Morgan & Nearing 2011) eikä välttämättä ole edes ratkaisevasti parempi kuin edeltäjänsä USLE (Shen et al. 2009). Tätä seikkaa ei SWAT:n dokumentaatiossa nosteta esiin lainkaan.



**Kuva 31.** Tutkielman edetessä ilmenneet SWAT-mallin positiiviset puolet ja ongelmakohdat. Hyvää- ja Pohdittavaa- kohdat kuvaavat hyvin fysikaalisia malleja ja niiden ominaisuuksia yleisesti. Huonoa-kohta tiivistää nimenomaan SWAT-mallin tämänhetkiset ongelmat. Metodologisten epävarmuuksien sijaan käyttäjän näkökulmasta suurimmat ongelmakohdat ovat peräisin mallin keskeneräisyydestä ja epähuomioissa sen sisälle jääneistä virheistä.

## 6.5 Kehitysideat ja jatkotutkimus

Monet aiemmista tutkimuksista liittyen eroosion ovat melko kuvailevia, ja niiden tuloksena on esimerkiksi eroosioriskiluokitus tai selvitys siitä, minkälaiset alueet ovat maatalouden näkökulmasta ongelmallisimpia aineksen liiallisen irtoamisen ja kulkeutumisen kannalta. Tämä tutkimus keskittyi eroosion absoluuttiseen kokonaismäärään. Jonkinlainen synteesi näiden kahden välillä asettaisi ilmiön ja ongelman suurempaan kontekstiin. Selkeiden ja ilmaisten aineistojen ansiosta itse tekninen suoritus mallin ajossa ei ole valtava, ja se voidaan toteuttaa täysin ilmaisilla paikkatieto-ohjelmistoilla. Ongelmana on tiettyjen maaperäarvojen puute Suomessa ja parametrien valtava määrä. Jos kaksi edellä mainittua seikkaa saataisiin edes jollain tasolla standardisoitua, olisi mahdollista siirtyä akateemisesta diskurssista paikallistason toimijoiden itse tuottamiin arvioihin ja riskikartoituksiin eroosion määrästä ja ongelmallisista paikoista. Tämän tyyllisiä tapauksia on jo Suomessa tehty esimerkiksi Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen toimesta (Lilja et al. 2014).

SWAT-mallin toimivuutta testattiin Etelä-Suomen olosuhteissa alueella, jossa ihmistoiminta on ja on ollut vahvaa pitkään. Myös ilmastonmuutosta simuloitiin tällä alueella. Mallin soveltaminen muille alueilla antaisi varmasti paremman kuvan ilmiön monimuotoisuudesta ja alueellisten tekijöiden vaikutuksesta eroosioon, sen määrään ja kuukausittaiseen vaihteluun.

Kuten edellä on mainittu, SWAT-mallia on Suomessa käytetty suhteellisen vähän. Merkittävimmät Suomen olosuhteissa tehdyt tieteelliset ja päätöksentekoa tukevat julkaisut on mielestäni esitetty tässä tutkielmassa. Helsingin yliopiston geotieteiden ja maantieteen osastolla mallin käyttö ja soveltaminen lienee ensimmäinen laatuaan, ainakin pro- gradu-tutkielmista. Täten varsinaista selkeää luonnonmaantieteellistä metodologista polkua fysikaalisten mallien valmisteluun, käyttöön ja soveltamiseen ei ole ollut olemassa. Valuma-alue- ja eroosiomallit sopivat kuitenkin luonteeltaan (luonnon)maantieteelliseen tarkastelunäkökulmaan ja istuvat hyvin GIS-opetuksen yhteyteen. Kyseisten fysikaalisten mallien soveltaminen laitoksella ja maantieteen osastolla meneillään oleviin tutkimussuuntauksiin ja -hankkeisiin voisi olla mielenkiintoista ja mahdollisesti uusia näkökulmia avaava ikkuna.

## 7. Johtopäätökset

Tutkielmassa pyrittiin selvittämään ilmastonmuutoksen vaikutusta eroosion määrään tyypillisellä eteläsuomalaisella valuma-alueella käyttäen fysikaalista eroosiomallia ja paikkatietoaineistoja. Eroosion tutkimisen lisäksi haluttiin selvittää SWAT-mallin toimivuutta Suomen olosuhteissa ja suhteellisen yksinkertaisten paikkatietoaineistojen ja menetelmien käyttökelpoisuutta. Sademäärien ja lämpötilojen kasvaessa eroosion kokonaismäärä kokonaisuutena tulee kasvamaan. Ilmiöön liittyy kuitenkin paljon paikallista maaperään ja maankäyttöön liittyvää vaihtelua.

SWAT-malli on valtavan monipuolinen kokonaisuus, joka mahdollistaa ilmiöiden ja ongelmien tarkastelun ja tutkimisen monella eri tavalla ja eri näkökulmista. Puhtaasti eroosioon liittyvä tutkimus ei kuitenkaan välttämättä ole mallin vahvuus, sillä se kompastuu helposti omaan monimutkaisuuteensa. Toisaalta joka ikisen aineiston, parametrin ja muuttujan voi teoriassa mitata tutkimusalueelta, joten mallilla on potentiaalia kuvata oikeata maailmaa tarkasti.

Tässä työssä etsittiin vastauksia ennen kaikkea seuraaviin kysymyksiin:

### **A) Kuinka paljon lämpenevä ja muuttuva ilmasto vaikuttaa eroosion määrään verrattuna nykytasoon?**

Kokonaisuutena sademäärien kasvu ja lämpötilojen nousu lisäävät eroosiota. Keskimäärin koko tutkimusalueen sisällä eroosio kasvoi 43-94%. Kasvua ei tapahdu kuitenkaan yksiselitteisesti läpi koko vuoden, vaan se keskittyy muutamille talvikuukausille. Tämä saattaa olla seurausta mallintamisessa tapahtuneista virheistä, joten yksiselitteistä vastausta on mahdoton antaa.

### **B) Mitkä tekijät vaikuttavat lisäävästi tai hillitsevästi eroosion määrään muuttuvassa ilmastossa?**

Eroosio ei kasva kautta linjan valtavasti. Hillitsevinä tekijöinä ovat selkeästi maaperä ja maanpeite- ja käyttö. Ne alueet, jotka nykyisin ovat lähimpänä luonnontilaa, kokevat selkeästi pienimmän eroosion lisäyksen tulevaisuudessa. Kalliomaa erodoituu luonnollisesti vähiten. Sen sijaan irtaimet maalajit, peltovaltaiset alueet ja muut maatalousalueet kokevat eroosion kasvua.



Kuukausittaisesta näkökulmasta tarkasteltuna muutosta ei näytä tapahtuvan mallin mukaan. Sademäärien kasvu kesällä ei lisää eroosiota merkittävästi.

**C) Kuinka hyvin eroosiota voidaan mallintaa SWAT-mallilla suhteellisen yksinkertaisin paikkatietoaineistoin Suomessa?**

Paikkatietoaineistot itsessään eivät näytä olevan ongelma. Paikallisten koealojen tai sademäärämittausten sijaan suurempi ongelma on SWAT-mallin vaatimien maaperätietojen puutteellisuus Suomessa. Vastaus on siis kaksijakoinen; toisaalta SWAT on hyvä mallinnusohjelma Suomen olosuhteisiin saatavilla olevin aineistoin, toisaalta parametrien valtava määrä vaatisi nykyistä laajempaa olemassa olevaa tutkimusta Suomen olosuhteista. Lisäksi SWAT-mallissa itsessään on vielä selkeitä puutteita ja sijaa jatkokehitykselle.

## 8. Kirjallisuus

- Abbaspur, K. C., E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang & B. Kløve (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large scale SWAT model. *Journal of Hydrology* 524, 733–752.
- Abbaspour, K. C. (2015). SWAT-Cup: SWAT Calibration and uncertainty programs – A User Manual.
- ACIA (2005). *Arctic Climate Impact Assessment*. 1042 s. Cambridge University Press, Cambridge.
- Arnold, J. G., K. R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney & S. L. Neitsch (2012). Soil And Water Assessment Tool. Input/Output Documentation version 2012. 654 s.
- Arnold, J. G., K. R. Srinivasan, R. S. Muttiah & J. R. Williams (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34:1, 73–89.
- Atkinson, P. (sinne anno). Silt sources and de-silting: river-bed protection and enhancement for the river Rede. Freshwater Biological Association. 21.5.2015. <<https://www.fba.org.uk/sites/default/files/Silt%20sources%20and%20desiltin%20river%20bed%20protection%20and%20enhancement%20for%20the%20River%20Rede.pdf>>
- Aura, E., K. Saareja & M. Rätty (2006). Savimaiden eroosio. MTT:n selvityksiä 118, 32 s.
- Bazzofi, P. (2009). Soil erosion tolerance and water runoff control: minimum environmental standards. *Regional Environmental Change* 9, 169–179.
- Betrie, G. D., Y. A. Mohamed, A. Van Griensven & R. Srinivasan (2011). Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 807–818.
- Bouraoui, F., B. Grizzetti, K. Granlund, S. Rekolainen & G. Bidoglio (2004). Impact of climate change on the water cycle and nutrient losses in a Finnish catchment. *Climatic Change* 66, 109 – 126.
- Bärlund, I., T. Kirkkala, O. Malve & J. Kämäri (2007). Assessing SWAT model performance in the evaluation of management actions for the implementation of the Water Framework Directive in a Finnish catchment. *Environmental Modelling & Software* 22, 719–724.
- Chahine, T. M. (1992). The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature* 359, 373–379.
- Cortés, J.N. & M. J. Risk (1985). A reef under siltation stress: Cahuita, Costa Rica. *Bulleting of Marine Science* 36: 2, 339–356.
- EPA (2012). Sediments: Ways to measure. 22.5.2015. <[http://www.epa.gov/caddis/ssr\\_sed\\_wtm.html](http://www.epa.gov/caddis/ssr_sed_wtm.html)>

- ESRI (2015). USA soil loss tolerance factor. 31.8.2015.  
<<http://www.arcgis.com/home/item.html?id=ef1e2d7ba93940b58c4f8e8d9b6514d0>>
- Euroopan Unioni (2000). Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2000/60/EY.  
Euroopan yhteisöjen virallinen lehti 327/1.
- FAO (1983). River Basins. 20.5.2015.  
<<http://www.fao.org/docrep/003/x6841e/X6841E05.HTM#CH5.1.2>>
- FAO (1995). Runoff, Erosion and sedimentation: prediction and measurement.  
22.5.2015. <<http://www.fao.org/docrep/v5400e/v5400e0b.htm>>
- Favis-Mortlock, D., J. Boardman & M. Bell (1997). Modelling long-term anthropogenic erosion of a loess cover: South Downs, UK. *The Holocene* 7:1, 79–89.
- Geologian tutkimuskeskus (2012). Rajapintapalvelut. 19.2.2016.  
<[http://gtkdata.gtk.fi/arcgis/services/Rajapinnat/GTK\\_Maapera\\_WFS/MapServer/WFSServer?>](http://gtkdata.gtk.fi/arcgis/services/Rajapinnat/GTK_Maapera_WFS/MapServer/WFSServer?>).
- Grimm, M., R. Jones & L. Montanarella (2002). Soil erosion risk in Europe. 2. p. 40 s.  
European communities, Italy.
- Grizzetti, B., F. Bouraoui, K. Granlund, S. Rekolainen & G. Bidoglio (2003).  
Modelling diffuse emissions and retention of nutrients in the Vantaanjoki watershed (Finland) using the SWAT model. *Ecological Modelling* 169: 1, 25 – 38.
- Hurni, H. (1983). Soil erosion and soil formation in agricultural ecosystems Ethiopia and Northern Thailand. *Mountain Research and Development* 3,2 131–142.
- Ilmatieteenlaitos (2009). Suomen maakuntien ilmastoja. J. Kersalo & P. Pirinen (toim.).185 s.
- Ilmatieteenlaitos (2011). Suomen luonnosta riippuvaisten elinkeinojen sopeuduttava ilmastomuutokseen. Tiedotearkisto: 2011. 29.7.2015.  
<<http://ilmatieteenlaitos.fi/tiedote/447785>>
- Ilmatieteenlaitos (2014). Sektoritutkimusohjelman ilmastoskenaariot (SETUKLIM).  
<<http://ilmatieteenlaitos.fi/setuklim>>
- IPCC (2007). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. 976 s.  
Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers.
- Jain, M. K. & U. C. Kothyari (2000). Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS. *Hydrological Sciences Journal* 45, 5.
- Kemker, C. (2014). Turbidity, Total Suspended Solids and Water Clarity. Fundamental of Environmental Measurement. Fondriest Environmental Inc. 21.5.2015.  
<<http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/>>

- Koskiaho, J., M. Puustinen, K. Koikkalainen, T. Salo & K. Piirimäe (2013). Modeling, assessments and cost-effectiveness analysis of constructed wetlands and active methods for the treatment of runoff from agricultural area. Final report of the Active Wetlands Interreg IVA project. MTT Report 94, 49 s.
- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf & F. Rubel (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15: 3, 259–263.
- Käyhkö, J. (2014). Muuttuuko Pohjolan ilmasto? Turun maantieteen laitoksen julkaisuja 168, 19–35.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation And Development* 12, 519–539.
- Lilja, H., E. Turtola, J. Hyväluoma, O. Hakala, M. Puustinen & J. Uusi-Kämpä (2014). Suomen peltojen karttapohjainen eroosioluokitus. MTT Raportti 133.
- Lu, H., C. Moran, I. Prosser & M. Sivapalan (2004). Modelling sediment delivery ratio based on physical principles. The International Environmental Modelling and Software Society 2004 Conference. 14.9.2015.  
<<http://www.iemss.org/iemss2004/pdf/ungauged/lumode.pdf>>.
- Maanmittauslaitos (2016). Avoimien aineistojen tiedostopalvelu. 23.1.2016.  
<<http://www.maanmittauslaitos.fi/aineistotpalvelut/latauspalvelut/avoimien-aineistojen-tiedostopalvelu>>.
- Mansikkaniemi, H. (1982). Soil erosion in areas of intense cultivation in southwestern Finland. *Fennia* 160: 2
- Michael, A., J. Schmidt, W. Erike, T. Deutschlander & G. Malitz (2005). Impact of expected increase in precipitation intensities on soil loss - results of comparative model simulations. *Catena* 61: 2-3, 155 – 164.
- Mingthipol, O. (sinne anno). On-site erosion of upland agriculture – A case study: local Thais Ban Kasai and Mien Ban La Bal Ya of Khunsamun watershed, Nan Basin. Department of Landscape and Environmental Conservation, Faculty of Agricultural Production. Maejo University, Thailand.
- Montgomery, R. D. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 14, 33, 13268– 13272.
- Morgan, R. P. C. & M. A. Nearing (2011). Model development: A user's perspective. *Handbook of Erosion Modelling*. 199 s.
- Nash, J. E. & J. V. Sutcliffe (1970). River flow forecasting through conceptual models part I – A Discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282– 290.
- Ndomba, P. M., F. W. Mtalo & Å. Killingtveit (2008). A guided SWAT model application on sediment yield modeling in Pangani river basin: lessons learnt. *Journal of Urban Engineering* 2: 2, 53– 62.

- Nearing M. A. (2001). Potential changes in rainfall erosivity in the United States with climate change during the 21st century. *Journal of Soil and Water Conservation* 56: 3, 229 – 232.
- Nearing, M. A., V. Jetten, C. Baffaut, O. Cerden, A. Couturier, M. Hernandez, Y. Le Bissonnais, M. H. Nichols, J. P. Nunes, C.S. Renschler, V. Souchere & K. Van Oost (2005). Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena* 61, 131–154.
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry & J. R. Williams (2011). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation version 2009.
- Nichols, G. (2009). Sedimentology and Stratigraphy. 2. p. 419 s. Wiley-Blackwell, Chichester.
- Nyholm, A.-M., H. Jansson, N. Puronummi, R. Nyholm, P. Ala-Opas, I. Hakala, E. Huitu, S. Mäkelä, T. Tulonen & L. Arvola (2003). Valuma-alueen ja vesistön välisen vuorovaikutuksen arviointi. *Maa- ja elintarviketalous* 38, 75 s.
- OMFRA (2012). Universal soil loss equation (USLE).  
<<http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/12-051.htm>>  
20.3.2016
- Oyang, W., A. K. Skidmore, F. Hao & T. Wang (2010). Soil erosion dynamics response to landscape pattern. *Science of the Total Environment* 408, 1358– 1366.
- Pagliero, I., Bouraoui, F., Willems, P. & Diels, J. (2011). SWAT modelling at pan European scale: the Dunbaue Basin Pilot Study. 2011 International SWAT Conference – Conference Proceedings.
- Panagos, P., P. Borrelli, J. Poesen, C. Ballabio, E. Lugato, K. Meusburger, L. Montanarella, C. Alwell (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy* 54, 438– 447.
- Pruski, F. F., & M. A. Nearing (2002). Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight U.S. locations. *Water Resources Research* 38:2.
- Puustinen, M., S. Tattari, J. Koskiahio & J. Linjama (2006). Influence of seasonal and annual hydrological variations on erosion and phosphorous transport from arable areas in Finland. *Soil & Tillage Research* 93, 44–55.
- Quinton, J. N. (1997). Reducing predictive uncertainty in model simulations: a comparison of two methods using the European soil erosion model (EUROSEM). *Catena* 30: 101-117.
- Räisänen, J. & R. Heino (2008). Klimatologian perusteita. Helsingin yliopiston fysiikan laitos.
- Salo, P., K. Valta & H. Mansikkaniemi (1985). Lapväärtinjoen ja Hyypänjoen valuma-alueiden eroosiotutkimus. *Vesihallitus-tiedotus* 267.
- Scopel, C. (2012). SWAT: Soil and water assessment tool. ESRI. 10.9.2015.  
<<http://blogs.esri.com/esri/arcgis/2012/03/14/swat-soil-water-assessment-tool/>>

- Setegn, S. G., B. Dargahi, R. Srinivasan & A. M. Melesse (2010). Modeling of sediment yield from Anjeni-Gauged watershed, Ethiopia using SWAT model. *Journal of the American Water Resources Association* 46, 3.
- Shen, Z. Y., Y. W. Gong, Y. H. Li, Q. Hong, L. Xu & R. M. Liu (2009). A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area. *Agricultural Water Management* 96; 10, 1435–442.
- Smith, R. M. & W. L. Stamey (1965). Determining the range of tolerable erosion. *Soil Science* 100, 6.
- SYKE (2014). Ladattavat paikkatietoaineistot. 20.1.2016. <[http://www.syke.fi/fi-FI/Avoin\\_tieto/Paikkatietoaineistot](http://www.syke.fi/fi-FI/Avoin_tieto/Paikkatietoaineistot)>
- SYKE (2016). Hertta-tietokanta. 20.1.2016. <[http://www.syke.fi/fi-FI/Avoin\\_tieto/Ymparistotietojarjestelmat](http://www.syke.fi/fi-FI/Avoin_tieto/Ymparistotietojarjestelmat)>
- Tarvainen, S., E. Koho, A.-M. Kouki & A. Salo (2005). Helsingin purot. Millaista vettä kaupungissamme virtaa? Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 7. 158 s.
- Tattari, S., J. Koskiahio, I. Bärlund & E. Jaakkola (2009). Testing a river basin model with sensitivity analysis and autocalibration for an agricultural watershed in SW Finland. *Agricultural And Food Science* 18, 428–439.
- Tattari, S. (sinne anno). Ravinnehuuhtoumamallien epävarmuudesta. Ympäristö.fi. 4.11.2015.<[http://www.ymparisto.fi/fiFI/TEHO\\_Plus/Tiedotteet\\_ja\\_tapahumat/Tapahtumaarkisto](http://www.ymparisto.fi/fiFI/TEHO_Plus/Tiedotteet_ja_tapahumat/Tapahtumaarkisto)>
- Texas A&M University/NCEP (2014). Global weather data for SWAT. 11.12.2015. <<http://globalweather.tamu.edu/>>
- Tynes Rivers Trust (2012). Siltation and pressure on river habitats. Tyne River Trust position statement on siltation and pressure on river habitats January 2012. 2 s. 13.8.2015. <<http://tynerivertrust.org/wp-content/uploads/2013/08/Position-statement-Siltation-and-pressure-on-river-habitats.pdf>>
- University of Saskatchewan (sinne anno). Water flow through soil – Hydraulic conductivity. 1.4.2016. <<http://engrwww.usask.ca/classes/MECAG/309/notes/m04flow.doc>>
- Verheijen, F., B. Jones, J. Rickson & C. Smith (2009). Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews* 94, 23–38.
- Vis, M. (1987). A procedure for the analysis of soil erosion and related problems in water and land resources management studies. Research report. Waterloopkundig laboratorium delft hydraulics laboratory. 65 s.
- White, J. M., R. D. Harmel, J. G. Arnold & J. R. Williams (2012). SWAT Check: A screening tool to assist users in the identification of potential model application problems. *Journal of Environmental Quality* 43: 1, 208–214.

- Wischmeier, W. H. & Sm. (1978). Predicting rainfall erosion losses ith, D. D– a guide to conservation planning. Supersedes Agriculture Handbook 282.
- World Meteorological Organization (2016). 2015 is hottest year on record. 10.1.2016. <<https://www.wmo.int/media/content/2015-hottest-year-record>>
- Zhang, G. H., M. A. Nearing & B. Y. Liu (2005). Potential effects of climate change on rainfall erosivity in the Yellow River basin of China. Transactions of the ASAE 48: 2, 511 – 517.
- Zhang, Y., J. Degroote, c. Wolter & R. Sugumaran (2009). Integration of Modified Soil Loss Equation (MUSLE) into a GIS Framework to Assess Soil Erosion Risk. *Land Degradation and Development* 20: 1, 84–91.

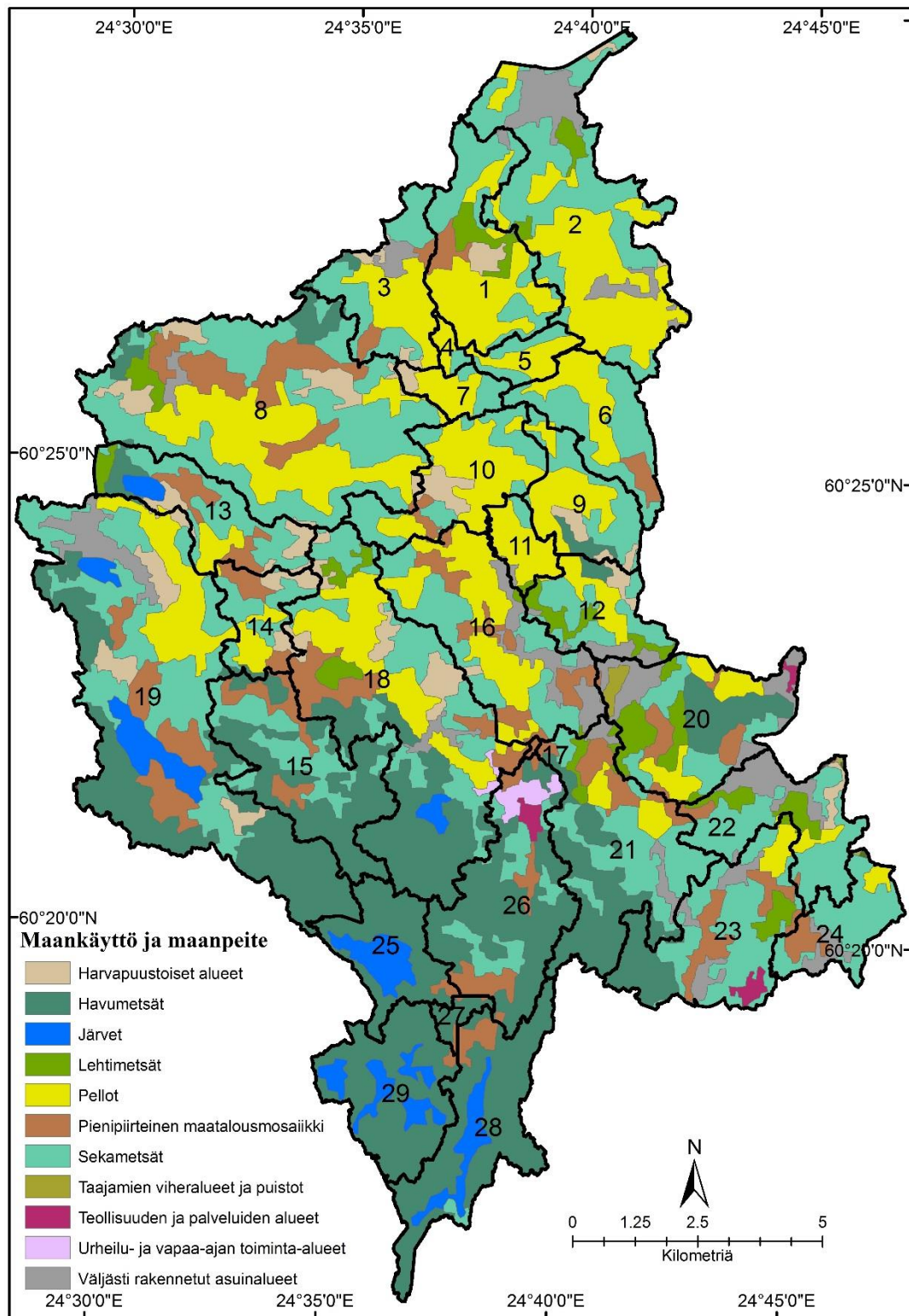
## Liitteet

**Liite 1.** Ilmastonaineiston rakenne (Arnold et al. 2012). Suuresta sarakemäärästään huolimatta aineisto rakentuu suurimmaksi osaksi tunnuksista ja lämpötila- ja sademääräarvoista johdetuista muuttujista. Rakenne oli valmiina mallinnusohjelman tietokannassa, joten muuttujia manipuloitiin manuaalisesti vain nostamalla tai laskemalla arvoja joko prosentuaalisella tai absoluuttisella muokkauksella.

| Muuttuja   | Selite  |
|------------|---|
| OID        | Yksilöllinen tunnus.  |
| SUBBASIN   | Osavaluma-alueen tunnus.  |
| STATION    | Sääaseman nimi.   |
| WLATITUDE  | Sääaseman latitudi.   |
| WLONGITUDE | Sääaseman longitudi.  |
| WELEV      | Sääaseman korkeus merenpinnasta.                                      |
| RAIN_YRS   | 30 minuutin maksimisadannan määrän mittausvuodet.                     |
| TMPMX      | Korkein keskimääräinen ilman lämpötila kuukaudessa.                   |
| TMPMN      | Matalin keskimääräinen ilman lämpötila kuukaudessa.                   |
| TMPSTDMX   | Kuukauden korkeimman lämpötilan keskihajonta.                         |
| TMPSTDMN   | Kuukauden matalimman lämpötilan keskihajonta.                         |
| PCPM       | Kuukauden keskimääräinen sademäärä.                                   |
| PCPSTD     | Päivittäisen sadannan keskihajonta kuukaudessa.                       |
| PCPSKW     | Päivittäisen sadannan vinous ( <i>skew coefficient</i> ) kuukaudessa. |
| PR_W1      | Sadepäivän todennäköisyys kuivan päivän jälkeen kuukaudessa.          |
| PR_W2      | Sadepäivän todennäköisyys sadepäivän jälkeen kuukaudessa.             |
| PCPD       | Sadepäivien keskimäärä kuukaudessa.                                   |
| RAINHHMX   | 30 minuutin maksimisadannan määrä kuukaudessa.                        |
| SOLARAV    | Keskimääräinen päivittäisen Auringon säteilyn määrä kuukaudessa.      |
| DEWPT      | Keskimääräinen kastepisteen lämpötila kuukaudessa.                    |
| WNDV       | Keskimääräinen tuulennopeus kuukaudessa.                              |



**Liite 2. Maankäyttö ja maanpeite valuma-alueittain (SYKE 2014).**



**Liite 3.** Maalajit valuma-alueittain (GTK 2012). Kuvasta näkyy karkea kaksijakoisuus maalajien osalta suhteessa valuma-alueisiin. Osaa hallitsevat kallioiset alueet, osaa hienojakoiset maalajit.

